

République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
المدرسة الوطنية العليا لعلوم البحر وتهيئة الساحل
Ecole Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral



Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur
d'état en sciences de la mer et de l'aménagement du littoral

Spécialité : Ingénierie de l'Environnement Marin et Côtier

Thème :

**Etude de l'impact du réchauffement des Eaux
Algériennes sur l'élévation du niveau de la mer par
les données altimétriques**

Présenté par :

GASMI Lamia

HAMACHE Oumayma

Soutenu le 29/09/2022 devant le jury composé de :

M ^{me} BENTCHIKOU	Maître Assistante A	ENSSMAL	Présidente
M ^{me} BENZOUAI	Maître de Conférence B	ENSSMAL	Promotrice
M ^{me} LOUANCHI	Professeur	ENSSMAL	Examinatrice
M ^{me} KERAGHEL	Maître de Conférence B	ENSSMAL	Examinatrice

Année universitaire : 2021- 2022

République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
المدرسة الوطنية العليا لعلوم البحر وتهيئة الساحل
Ecole Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral



Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Science de la nature et de la vie

Filière : Hydrobiologie marine et continentale

Spécialité : Ingénierie de l'Environnement Marin et Côtier

Thème :

**Etude de l'impact du réchauffement des Eaux
Algériennes sur l'élévation du niveau de la mer par
les données altimétriques**

Présenté par :

GASMI Lamia

HAMACHE Oumayma

Soutenu le 29/09/2022 devant le jury composé de :

M ^{me} BENTCHIKOU	Maître Assistante A	ENSSMAL	Présidente
M ^{me} BENZOUAI	Maître de Conférence B	ENSSMAL	Promotrice
M ^{me} LOUANCHI	Professeur	ENSSMAL	Examinatrice
M ^{me} KERAGHEL	Maître de Conférence B	ENSSMAL	Examinatrice

Année universitaire : 2021- 2022

Dédicaces

Avec l'expression de ma reconnaissance, je dédie ce modeste travail à ceux qui, quels que soient les termes embrassés, je n'arriverais jamais à leur exprimer mon amour sincère.

A l'homme, mon précieux offre du Dieu, qui doit ma vie, ma réussite et tout mon respect : **mon cher Papa.**

A la femme qui a souffert sans me laisser souffrir, qui n'a jamais dit non à mes exigences et qui n'a épargné aucun effort pour me rendre heureuse : **ma perle précieuse, Maman**

A mes chères sœurs et frère... Qui n'ont pas cessé de me conseiller, encourager et soutenir tout au long de mes études. Que Dieu les protège et leurs offre la chance et le bonheur.

A mes adorables neveux et nièces... qui savent toujours comment procurer la joie et le bonheur pour toute la famille.

A ma grand-mère, mes oncles et mes tantes. Que Dieu leur donne une longue et joyeuse vie.

A mes chères copines : **Maroua, Dalya, Mounia, Khalida, Nesrine, Sara** pour leurs soutien moral, leurs patiences et leurs compréhensions tout au long de ce projet

A tous les cousins, les cousines et les amis que j'ai connu jusqu'à maintenant.

Merci pour leurs amours et leurs encouragements.

Lamia

Remerciement

Comme l'a dit un jour l'ancien président des Etats-Unis, Bill Clinton, "Nous ne pouvons construire notre propre avenir sans aider les autres à construire le leur."

Par cette citation, je voudrais remercier toutes les personnes qui m'ont accompagné dans la réalisation de ce mémoire.

Merci de m'avoir aidé à construire mon avenir.

Durant mon cursus, j'ai eu l'occasion de rencontrer un grand nombre de personnes qui ont pris le temps d'échanger avec moi et de partager leur connaissance, je les remercie de tout mon cœur.

Je voudrais adresser toute ma reconnaissance à **Madame BENZOUAI** notre promotrice, pour le temps passé ensemble et le partage de ses connaissances. Grâce aussi à sa confiance, on a pu s'accomplir totalement dans notre mission, et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter notre réflexion. Ils furent d'une aide très précieuse dans les moments les plus délicats.

On tient à remercier aussi tous les membres du jury pour leurs bienveillances de vouloir juger notre travail.

Nos gratitude au corps professoral et administratif du l'ENSSMAL d'avoir enrichi de maintes connaissances et d'un bagage technique qui nous facilitera la confrontation du monde de travail avec le nécessaire de compétence, de sérieux et de responsabilité.

Résumé

Depuis le début des années 1990, l'altimétrie satellitaire fournit des mesures très précises des variations du niveau de la mer avec une résolution spatio-temporelle élevée et une couverture globale. Ces progrès ont permis d'affiner la précision de la mesure à l'interface air-mer ce qui a encouragé les études régionales à l'échelle du plateau continental. Dans ce cadre, nous avons étudié la dynamique de la hauteur de la surface de la mer dans les eaux Algérienne grâce aux données analysées fournies par le Copernicus Marine Service.

En effet, l'exploitation de trente-quatre ans (1987-2020) de données mensuelles de la SSH nous a permis d'évaluer sa variabilité mensuelle, saisonnière, annuelle et interannuelle et établir un lien avec la température de la surface de la mer.

Abstract

Since the early 1990s, satellite altimetry has provided very accurate measurements of sea level variations with high spatial and temporal resolution and global coverage. These advances have allowed to refine the accuracy of the measurement at the air-sea interface, which has encouraged regional studies at the continental shelf scale. In this context, we studied the dynamics of the sea surface height in Algerian waters through the analyzed data provided by the Copernicus Marine Service.

Indeed, the exploitation of thirty-four years (1987-2020) of monthly data of the SSH allowed us to assess its monthly, seasonal, annual and interannual variability and establish a link with the sea surface temperature.

ملخص

منذ أوائل التسعينيات، قدم قياس الارتفاع بالأقمار الصناعية قياسات دقيقة للغاية لتغيرات مستوى سطح البحر مع دقة مكانية وزمنية عالية وتغطية عالمية. وقد سمحت هذه التطورات بتحسين دقة القياس في السطح البيئي الجوي والبحري، مما شجع الدراسات الإقليمية على مستوى الجرف القاري. في هذا السياق، درسنا ديناميكيات ارتفاع سطح البحر في المياه الجزائرية من خلال البيانات التي تم تحليلها والتي قدمتها خدمة كوبرنيكوس البحرية. في الواقع، سمح لنا استغلال أربعة وثلاثين عامًا (1987-2020) للبيانات الشهرية لـ SSH بتقييم تقلباته الشهرية والموسمية والسنوية وما بين السنوات وإقامة صلة مع درجة حرارة سطح البحر.

Sommaire

Liste des figures	8
Liste des tableaux	10
Liste des acronymes	11
Introduction générale.....	2
1 Chapitre I : Généralités	5
1.1 Introduction	5
1.2 Littoral algérien	5
1.3 Réchauffement des eaux à l'échelle de la Méditerranée.....	5
1.4 Conséquences du réchauffement des eaux marines.....	6
1.5 Hauteur de la surface de la mer	8
1.5.1 Définitions préliminaires	8
1.5.2 Définitions des champs altimétriques	8
1.6 La Télédétection pour l'estimation de la dynamique de la SSH	9
1.6.1 Définition	9
1.6.2 Types de Télédétection.....	9
1.7 Principe de mesure de la SSH spatiale.....	10
1.8 Satellites de la SSH	11
1.8.1 Le programme Copernicus	12
1.8.2 Les services Copernicus	12
1.8.3 Le service Copernicus de surveillance de l'environnement marin (CMEMS) ...	13
1.8.4 Format des données téléchargées de Copernicus (Format NetCDF) :	13
1.8.5 Produit CMEMS.....	14
1.9 Les marégraphes.....	15
1.10 Indicateur de l'expansion thermique (Hauteur de surface de la mer).....	15
1.11 Mesure <i>in situ</i> en Algérie	15

2	Contexte général de la zone d'étude	18
2.1	Introduction	18
2.2	La mer Méditerranée	18
2.2.1	Bassin occidental	18
2.2.2	Bassin Algérien	19
2.3	Présentation de la zone d'étude :.....	19
2.3.1	Le plateau continental algérien	19
2.3.2	Climat de la zone	19
3	Chapitre III : Matériels et Méthodes.....	22
3.1	Données.....	22
3.2	Matériels	22
3.2.1	SeaDAS	22
3.2.2	ArcGIS	23
3.2.3	Excel.....	23
3.3	Méthodes.....	23
3.3.1	Régionalisation de la zone d'étude.....	24
3.3.2	Téléchargement des données.....	25
3.3.3	Extraction des statistiques :	25
3.3.4	Prétraitement	25
3.3.5	Les tests statistiques :	27
4	Chapitre IV : Résultats et Discussions	31
4.1	Introduction	31
4.2	Les variabilités mensuelles.....	31
4.3	Les variabilités interannuelles saisonnières	34
4.4	Les variabilités interannuelles	38
4.5	Climatologie	41
4.6	Anomalies standardisées des SSHs annuelles (1987-2020)	45

4.7	Climatologie de la SSH comparé à la SST (1987 à 2020)	48
4.8	Variations interannuelles des SSTs mensuelles et des SSHs mensuelles	51
4.9	Résultats des tests	53
4.9.1	Test de normalité	53
4.9.2	Tests d'autocorrélation (test de J.Durbin et G.Watson)	55
4.9.3	Test de Mann –Kendall	56
4.9.4	Test de corrélation (Spearman)	58
Conclusion générale :		63
Références bibliographiques		64

Liste des figures

Figure 1-1 : les différentes définitions des champs altimétriques (crédit : CLS)	9
Figure 1-2 : Principe de la mesure de la SSH (source : CLS)	11
Figure 1-3 : Couverture du satellite SENTINEL-3A (Trace) au-dessus des îles Baléares en mer Méditerranée (Crédit : isardSAT)	11
Figure 1-4 : : L'interface de programme Copernicus (https://marine.copernicus.eu/).....	12
Figure 1-5 : Le Réseau Algérien d'Observations du Niveau de la Mer	16
Figure 3-1: Méthodologie suivie dans notre étude	23
Figure 3-2 : Plateau continental Algérien. Les six régions proposées (R1-R6)	24
Figure 3-3 : Etapes de téléchargement des données NetCDF nécessaire pour l'étude depuis la plateforme Copernicus Marine Service	25
Figure 4-1 : Variabilités mensuelles des hauteurs de la surface de la mer (01/1987 - 05/2020). Région (R1-R6) et le shelf.....	33
Figure 4-2 : Variabilité interannuelle des SSHs saisonnières (1987-2019) le long des six régions du plateau continental. Les couleurs bleu, vert, jaune et marron représentent respectivement les saisons de l'hiver, du printemps, de l'été et de l'automne.....	36
Figure 4-3 : schéma explicatif de la dynamique de la SSH (variable Zos).....	37
Figure 4-4 : Variabilités interannuelles des SSHs des six région (1-6) et le shelf (a-g) respectivement	40
Figure 4-5 : Climatologie de la SSH pour chaque région (1-6) du plateau continental algérien de (1987-2020)	43
Figure 4-6 : Climatologie des SSHs du plateau continental et du talus algérien de (1987-2020).....	44
Figure 4-7 : Anomalies standardisées des SSHs annuelles (1987-2020) des six régions (1-6) et le shelf.....	47

Figure 4-8 : Climatologie de la SSH comparé à la SST (1987 à 2020) dans les régions (1-6).....	49
Figure 4-9 : Variations interannuelles (1987-2019) des SSH(s) mensuelles (trait noir) et des	52
Figure 4-10 : Boîte à moustache de la Région 1.....	54
Figure 4-11 : La boîte à moustache dans l'état normal et non normal	54
Figure 4-12 : Résultat du test de Durbin-Watson pour, variabilités annuelles de la SSH 1987/2020 Région 1.....	55
Figure 4-13 : Résultat de test de Mann-Kendall, SSH annuelle (1987-2020) Région1....	57
Figure 4-14 : Résultat de test de corrélation « Spearman », pour climatologie (R1).....	58

Liste des tableaux

Tableau 1-1 : les marégraphes installés le long de la côte algérienne (source :INCT-SHFN).....	16
Tableau 3-1 : Caractéristiques des données utilisées dans notre étude.....	22
Tableau 3-2 : Les délimitations géographiques des six régions proposées.....	24
Tableau 4-1 : Pics des SSHs mensuelles (1994-2019) le long des eaux du plateau algérien	34
Tableau 4-2 : Pics saisonnier de la SSH (1987-2013)	37
Tableau 4-3 : Pics des valeurs SSHs comparées aux valeurs des SSTs	50
Tableau 4-4 : Résultats du Test de normalité	53
Tableau 4-5 : Résultats du test de normalité appliqué sur l'ensemble de données de la SSH (1987-2020) le long des six régions.	55
Tableau 4-6 : Résultats du test de Durbin-Watson appliqué sur l'ensembles de données de la SSH (1987-2020) le long des six région (R1-R6)	56
Tableau 4-7 : Résultats du test de Mann- Kendall appliqué sur l'ensembles de données de la SSH (1987-2020) le long des six région (R1-R6)	57
Tableau 4-8 : Résultats du test de corrélation « Spearman », Rho appliqué sur l'ensembles de données climatologiques de la SSH et les variabilités interannuelle de la SST et de la SSH (1987-2020) le long des six région (R1-R6).....	59
Tableau 4-9 : Résultats du test de corrélation « Spearman », nuage de points appliqué sur l'ensembles de données climatologiques de la SSH et les variabilités interannuelle de la SST et de la SSH (1987-2020) le long des six région (R1-R6).....	59

Liste des acronymes

ADT : Absolute Dynamic Topography

ANRH : Agence Nationale Des Ressources Hydraulique

cm: Centimètre

CMEMS: Copernicus Monitoring Environment Service

DUACS: Data Unification and Altimeter Combination System

ECV : Essential Climatic Variables

GIEC : Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du climat.

GMES: Global Monitoring for Environment and Security

Lidar : LIght Detection And Ranging

MCN : Marégraphe Numérique Côtier

MODIS : Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

MSS : Surface moyenne de la mer

NAO : L'oscillation nord-atlantique

NEMO: Nucleus for European Modelling of the Ocean

NetCDF: Network Common Data Form

Radar: Radio Detection And Ranging

SeaDAS: SeaWIFS Data Analysis System

SHFN : Service Hydrographique de la Marine

SLA: Sea Level Anomaly

SLR: Sea Level Rise

SSH: Sea Surface Height

SST: Sea Surface Temperature

Introduction Générale

Introduction générale

Le changement climatique est la variation significative des conditions météorologiques moyennes qui deviennent, plus chaudes, plus humides ou plus sèches, sur une période de 30 ans ou plus. C'est la tendance à plus long terme qui différencie le changement climatique de la variabilité naturelle du temps. Il est dû à une augmentation des concentrations de gaz à effet de serre (dioxyde de carbone (CO₂), méthane (CH₄) et oxyde nitreux (N₂O)) dans l'atmosphère.

La Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC) définit les changements climatiques comme "les changements de climat qui sont attribués directement ou indirectement à une activité humaine altérant la composition de l'atmosphère mondiale et qui viennent s'ajouter à la variabilité naturelle du climat observée au cours de périodes comparables."

Les littoraux, à l'instar des autres espaces sont caractérisés comme des espaces extrêmement riches au plan écologique, mais parallèlement très vulnérables aux perturbations anthropiques et climatiques, car situés à l'interface de nombreux compartiments environnementaux, usages et activités humaines, dont l'expression « interface terre-mer » rend compte de manière synthétique. Les littoraux constituent en outre des territoires de vie très dynamiques et attractifs.

Aujourd'hui, il est largement admis que les catastrophes côtières sont assignables au réchauffement climatique planétaire. Ces catastrophes naturelles auront un impact négatif sur la zone côtière dans la mesure où elle abrite des établissements humains et des infrastructures.

Longue d'un peu plus de 1600 km, la côte algérienne présente certains risques pour son exploitation et son développement, y compris les problèmes liés à l'érosion et les inondations côtières. Ces impacts peuvent augmenter avec l'élévation attendue du niveau marin (**Jiménez et Sánchez Arcilla 1997**). L'élévation effective et attendue du niveau de la mer Méditerranée qui représente l'un des enjeux majeurs pour l'Algérie durant les années à venir.

Dans ce travail, qui est considéré comme le premier travail sur le plateau continental algérien, nous avons analysé trente-quatre ans de données altimétriques à l'échelle du pixel (4km), couvrant l'ensemble des eaux du plateau continental et du talus. Ceci nous a permis une évaluation multi temporelle et multi spatiale de la dynamique du niveau de la mer. Ceci nous a permis de confirmer certains patterns établis à l'échelle de la Méditerranée et de poser des questions sur le devenir de la SSH si les températures de la mer continuent à augmenter.

Le présent mémoire s'articule en quatre chapitres.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté la problématique du réchauffement des eaux marines et ses conséquences, en particulier, l'augmentation du niveau de la mer. Nous abordons également les outils technologiques qui permettent d'estimer qualitativement et quantitativement cette augmentation.

Le second chapitre est consacré à un état des connaissances sur la zone d'étude et à énumérer ses principales caractéristiques.

Le troisième chapitre porte sur la présentation des données et le matériel utilisé ainsi que la méthodologie suivie pour réaliser cette étude.

Le quatrième chapitre présente les différents résultats obtenus après traitement et analyse des données. Ces résultats concernent les variabilités mensuelles, annuelles, climatologiques, saisonnière et les anomalies le long des six régions du plateau continental et du talus algériens.

Enfin, une conclusion générale qui tente de synthétiser, d'une manière illustrative les principaux résultats acquis et de faire ressortir les renseignements essentiels.

Chapitre I :
Généralités

1 Chapitre I : Généralités

1.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons la problématique du réchauffement des eaux marines et ses conséquences, en particulier, l'augmentation du niveau de la mer. Nous abordons également les outils technologiques qui permettent d'estimer qualitativement et quantitativement cette augmentation.

1.2 Littoral algérien

La notion de "littoral" au sens général fait référence à l'interface de contact entre la terre et la mer. Sa définition exacte est difficile à cerner, compte tenu des différents concepts qui lui sont attribués (géographie, reliefs, océans, biologie, systèmes juridiques en vigueur) (**Otmani, 2020**).

Les littoraux sont des espaces particulièrement vulnérables du fait de leur mobilité permanente, de la diversité des écosystèmes qu'ils abritent et des transformations qu'ils subissent. La côte algérienne est traditionnellement divisée en trois zones côtières : orientale, centrale et occidentale (**Ghodbani & Bougherira, 2019**). Elle s'étend de l'écorégion méditerranéenne la plus occidentale (mer d'Alboran) au centre-sud de la Méditerranée. La variabilité géomorphologique naturelle de la côte se superpose aux caractéristiques océanographiques à grande échelle pour déterminer la composition et la structure du sous-sol supérieur (**Bermejo et al., 2015**).

Près de 45% de la population algérienne vit et travaille dans les wilayas côtières et le littoral abrite les principales villes et zones industrielles algériennes (**Grimes et al., 2010; Bahbah et al., 2020**).

Le littoral algérien est très diversifié (falaises, plages, dunes et zones humides) et est largement en proie à des problèmes d'érosion qui ne cessent de s'aggraver du fait des forces naturelles et anthropiques qui s'exercent sur lui à différentes échelles. Ces restrictions entraînent un recul du littoral, entraînant la disparition de certaines plages (**Otmani, 2020**).

Dans notre étude, nous nous intéressons aux eaux algériennes pour désigner les eaux du plateau continental et du talus algérien.

1.3 Réchauffement des eaux à l'échelle de la Méditerranée

Plusieurs auteurs ont étudié les tendances de la SST (*Sea surface temperature*) dans le bassin méditerranéen et ce, à plusieurs échelles temporaires. De 1985 à 2006, la tendance à l'ouest du bassin était de 0,03 °C/an, et de 0,05 °C/an à l'est du bassin (**Nykjaer, 2009**). Des tendances similaires ont été signalées par **Skiriris et al (2012)**, avec des taux de réchauffement annuels moyens d'environ 0,037 °C/an dans le bassin méditerranéen, de 0,026 °C/an et de 0,042 °C/an dans l'ensemble des sous-bassins ouest et est, respectivement. **Mohamed et al (2019)** a également

trouvé une tendance au réchauffement de 0,036 °C/an dans la série de 25 ans de 1993 à 2017. Des études avec des séries temporelles plus longues, telles que l'étude de **Shaltout & Omstedt (2014)**, ont déterminé une tendance au réchauffement de 0,36 °C/décennie pour le bassin méditerranéen global pour la série trentenaire 1982-2012. Dans **Pastor et al (2018)**, la tendance au réchauffement annuel de la moyenne globale de la SST méditerranéenne désaisonnalisée de 1982 à 2016 est de 0,036 °C/an.

Dans un article récent de Pisano (2020), les tendances de la température de la surface de la mer, sont de 0,041 °C/an sur l'ensemble de la mer Méditerranée de 1982 à 2018, de 0,036 °C/an dans le bassin occidental et de 0,048 °C/an dans le bassin Levantin-Égéen. Un rapport récent du Copernicus Marine Service (**von Schuckmann et al., 2019**) a montré une tendance au réchauffement de 0,04 °C/an du bassin méditerranéen. Les résultats de ces études s'accordent sur une tendance positive au réchauffement dans tout le bassin méditerranéen depuis le début des années 1980 (**Pastor et al., 2020**).

1.4 Conséquences du réchauffement des eaux marines

Avec l'incapacité de contrôler le réchauffement climatique, les chercheurs s'attendent à une augmentation du niveau global de la mer. Par conséquent, cela va fortement affecter l'augmentation du niveau de la mer Méditerranée en raison de sa connexion au système océanique mondial via le Détroit de Gibraltar (**Environnement et al., 2014**).

Le réchauffement climatique est dû principalement à la rétention des gaz à effet de serre dans l'atmosphère pendant de nombreuses années. Ceci engendre à long terme de néfastes conséquences sur l'environnement. De nombreux effets se sont produits et continueront à se produire à l'avenir si le réchauffement climatique se poursuit. Cela inclut la fonte des calottes polaires, les conséquences économiques, le réchauffement des eaux marines (**Mukherjee, 2016**). Parmi les conséquences majeures de ce réchauffement, citons :

Pertes massives des récoltes : "Le changement climatique devrait avoir l'impact le plus grave sur l'approvisionnement en eau". Les pénuries à venir risquent de menacer la production alimentaire, de réduire les conditions sanitaires, d'entraver le développement économique et d'endommager les écosystèmes. Il provoque des oscillations plus violentes entre les inondations et les sécheresses.

Disparition des récifs coralliens : le "blanchiment" des coraux dû à des augmentations légères mais prolongées de la température de la mer constitue un grave danger pour les écosystèmes océaniques, et de nombreuses autres espèces dépendent des récifs coralliens pour leur survie. Selon une nouvelle étude de l'UNESCO, les récifs coralliens du monde entier, de la Grande Barrière de Corail au large de l'Australie aux Seychelles au large de l'Afrique de l'Est, sont menacés de

disparaître complètement à l'horizon 2050, si les émissions de carbone ne diminuent pas suffisamment pour ralentir le réchauffement des océans. Sur les 29 zones de récifs coralliens inscrites au patrimoine mondial de l'UNESCO, au moins 25 connaîtront deux événements de blanchiment graves par décennie vers 2040 (Parker & Welch, 2017).

Réchauffement des océans : La hausse des températures rend la vie difficile pour les créatures marines. Ces changements transforment les chaînes alimentaires de bas en haut. De plus, de nombreux poissons se dirigent vers les pôles à la recherche d'eaux plus fraîches, ce qui a des implications dans l'industrie de la pêche (**How Climate Change Impacts Our Water , 2019**). Ils pourraient entraîner l'extinction de plus d'un million d'espèces.

Modification des courants océaniques : Les changements de température et de salinité des eaux (lorsque les glaces terrestres et aux pôles fondent) affectent la densité des masses d'eau, ce qui pourrait ralentir la plongée des eaux froides vers les grands fonds. Les courants marins pourraient être modifiés. Les changements affectant le régime des courants et des vents peuvent provoquer des dérèglements climatiques comme des tempêtes violentes.

Montée du niveau de la mer à l'échelle global : L'une des conséquences du réchauffement de l'océan mondial et de la fonte des calottes polaires est l'élévation du niveau moyen des mers. Ce qu'il peut exercer une pression importante sur les sociétés côtières très peuplées et les pays insulaires de faible altitude dans le monde entier (**Swapna et al., 2020**). Cette augmentation du niveau des océans et mers n'est pas uniforme au niveau planétaire. Par exemple, elle est de 1,7 mm par an en Mer Noire ; 2,5 mm par an en Méditerranée et jusqu'à 4,5 mm par an dans la mer Baltique. Le niveau moyen a augmenté d'environ 23 cm depuis 1880, et de 7,5 cm ces 25 dernières années. Chaque année, le niveau des océans et des mers monte de 3,2 mm. D'après des recherches publiées le 15 février 2022, le niveau des océans s'élève de plus en plus vite et devrait gagner 30 cm d'ici à 2050 (**Nunez, 2022**).

La dilatation thermique : Quand l'eau se réchauffe, son volume augmente. Les océans réchauffés prennent tout simplement plus de place et sont responsables pour moitié de l'élévation du niveau des mers constaté ces 25 dernières années.

Dans ce travail, nous nous intéressons principalement à ce problème de l'élévation du niveau de la mer et plus précisément l'étude de la hauteur de la surface de la mer et sa relation avec la température de surface de la mer.

1.5 Hauteur de la surface de la mer

1.5.1 Définitions préliminaires

Avant de donner les différentes définitions des champs altimétriques, nous devons présenter les surfaces de référence. Il existe deux types de surface ; une surface physique appelée le géoïde et une surface mathématique nommée l'ellipsoïde.

- **Géoïde** : Le géoïde est une surface équipotentielle. Il représente la forme que prendrait la surface de l'océan si elle était uniquement sous l'influence de la gravité terrestre. A noter : en pratique, d'autres forces contribuent également aux variations dynamiques de la surface de la mer (ex : vents, marées).
- **Ellipsoïde de référence** : L'ellipsoïde de référence est un modèle géométrique défini pour représenter le mieux la forme de la terre. Il se rapproche du géoïde et sert à définir le système de positionnement sur Terre. Un tel système est aussi appelé « système géodésique » et il sert d'origine pour l'altitude de l'altimètre. L'ellipsoïde de référence utilisé dans le traitement altimétrique du Data Unification and Altimeter Combination System (DUACS) était le Topex/Poséidon. Depuis 2021, l'ellipsoïde WGS84 est devenu la référence pour le GPS et a remplacé cet ellipsoïde historique.

1.5.2 Définitions des champs altimétriques

- **Hauteur de la surface de la mer (SSH)** : La SSH (Sea Surface High) est la hauteur entre l'ellipsoïde de référence et la surface de la mer. Or, la mesure de la télédétection altimétrique est la « portée », c'est-à-dire la distance entre la surface de la mer et le satellite. Connaissant l'altitude du satellite, cette mesure permet de calculer la SSH ($SSH = \text{Altitude} - \text{Portée}$) (voir figure 1-1)
- **Topographie dynamique absolue (ADT)** : Parfois, notamment dans les données de modélisation, le nom SSH est donné pour définir la « hauteur de la surface de la mer au-dessus du géoïde ». Cette hauteur est mieux appelée Topographie Dynamique Absolue (ADT).
- **Surface moyenne de la mer (MSS)** : La différence entre l'ADT et la SSH est la surface moyenne de la mer (MSS). La MSS donne l'état moyen temporel de la surface de la mer.
- **Anomalie du niveau de la mer (SLA)** l'Anomalie du niveau de la mer (SLA) est la partie variable de la SSH autour de son état moyen (MSS) : Sa valeur dépend donc également de la période de référence utilisée pour la mesure de la MSS. C'est aussi la

différence entre la ADT et la topographie dynamique moyenne (MDT).

- **Topographie dynamique moyenne (MDT)** : sa définition ressemble à celle de la MSS mais au-dessus du géoïde et non au-dessus de l'ellipsoïde. Les produits altimétriques L3/L4 donnent accès à la fois à SLA et ADT ou à MDT.

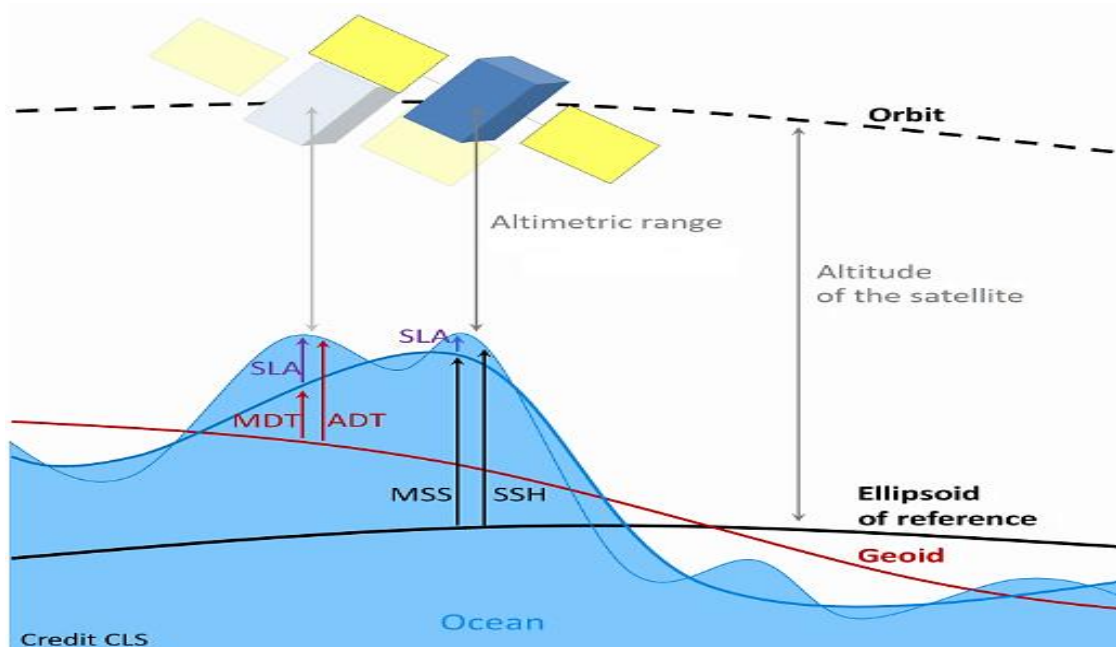


Figure 1-1 : les différentes définitions des champs altimétriques (crédit : CLS)

1.6 La Télédétection pour l'estimation de la dynamique de la SSH

1.6.1 Définition

La télédétection est l'ensemble des technologies qui permettent l'obtention des informations sans contact direct avec la surface de la Terre, y compris l'atmosphère et les océans, en acquérant des images. La télédétection implique la capture et l'enregistrement de l'énergie du rayonnement électromagnétique émis ou réfléchi, le traitement et l'analyse des informations qu'il représente, puis l'application de ces informations (Aquaportail, 2009).

En océanographie, la télédétection permet une vision synoptique de vastes régions qu'il est impossible d'obtenir par les moyens traditionnels (bateaux).

1.6.2 Types de Télédétection

1.6.2.1 Télédétection passive

Les capteurs passifs utilisent l'énergie naturelle (Soleil) réfléchie ou émise par une surface sur la Terre. Par conséquent, ils observent seulement de jour. Les technologies des capteurs de

télétection dépendent du type d'énergie qu'elles utilisent (**Piero, 2018**).

Lorsque les capteurs mesurent la lumière solaire réfléchi dans les longueurs d'onde du visible, ils sont appelés capteurs optiques passifs.

1.6.2.2 Télédétection active

Les capteurs actifs fournissent leur propre énergie par l'émission d'un rayonnement électromagnétique laser ou micro-ondes, pour éclairer les objets. Un capteur actif peut fonctionner jour et nuit et même en temps nuageux (**Piero, 2018**).

Il existe deux types de capteurs actifs ; le Radar et le Lidar.

Le Radar (*Radio Detection And Ranging*) opère dans la partie des micro-ondes et se caractérise par une visée latérale basée sur la mesure et le classement des distances Radar – cible. Il en résulte des images difficiles à interpréter par le cerveau humain mais très riches en informations.

Le Lidar (*Light Detection And Ranging*) est une forme de télétection optique active (Knudby, 2021) ; Il opère dans le visible, le proche infrarouge et les micro-ondes. Il se caractérise par une visée verticale basée sur la mesure de la distance Lidar – Cible de laquelle est déduite la grandeur utile, la hauteur de la cible. Cette dernière est calculée en tout point de la trajectoire (trace) du satellite, et est donnée par la mesure du temps mis entre l'émission des impulsions lumineuses et leur retour à l'appareil de mesure, divisé par la vitesse de la lumière. Les appareils modernes de mesure LiDAR émettent généralement jusqu'à 1 million de pulsions/seconde et même plus (**Trifide, 2016**).

Le Lidar a des champs d'application divers et variés, tel que la mesure de la hauteur des forêts, la hauteur du bâti et la hauteur de la mer. Cette étude se focalise sur l'exploitation de la hauteur de la mer mesurée par les altimètres spatiaux.

1.7 Principe de mesure de la SSH spatiale

Le principe de mesure de la SSH par altimétrie radar satellitaire est basé sur la mesure du temps d'aller-retour d'une onde émise par le satellite après réflexion sur la surface de la mer (**voir figure I-2**). L'écho de chaque impulsion est détecté et analysé à bord du satellite, ce qui conduit à une détermination précise de la distance entre le satellite et le niveau de la mer en fonction de la durée T d'aller-retour du signal radar et de la célérité c de propagation de l'onde.

Nous avons $2R = c T$ avec R , la distance altimétrique et la $SSH = S-R$ avec S , l'altitude du satellite (Sui et al., 2017).

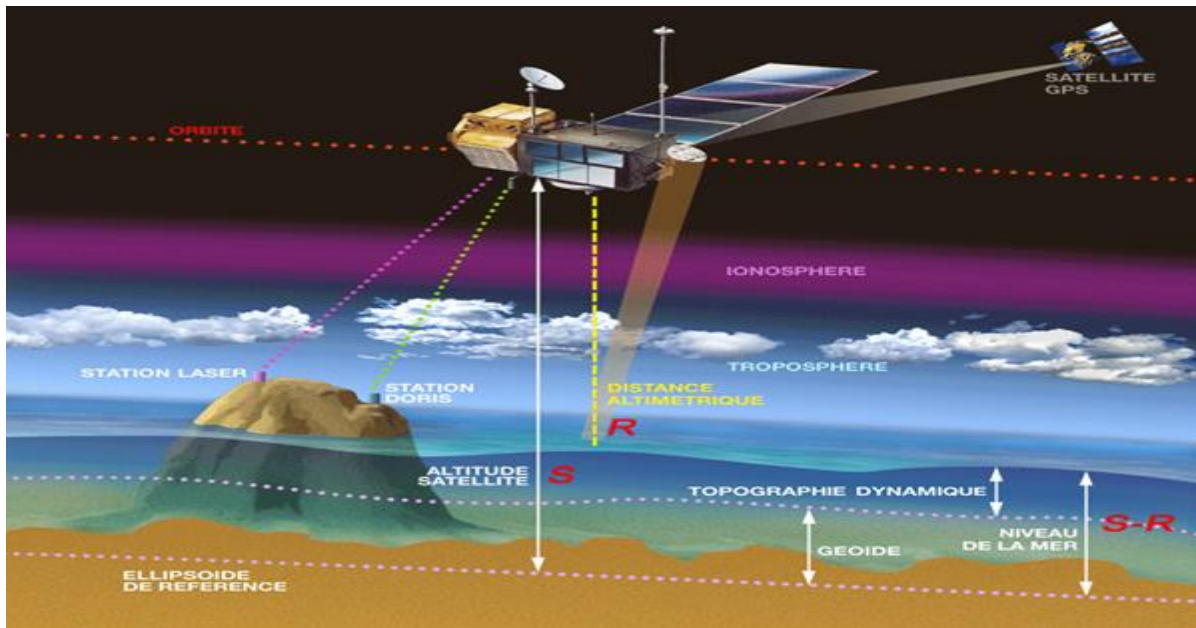


Figure 1-2 : Principe de la mesure de la SSH (source : CLS)

1.8 Satellites de la SSH

La mesure de la SSH spatiale bénéficie d'une couverture temporelle presque interrompue et ce, grâce aux différentes missions satellitaires quasi continues. Nous citons à titre d'exemple :

- **ENVISAT (2002-2012)** de l'ESA avec ses dix instruments dont l'altimètre RA-2.
- **JASON-3 (2016)** avec son altimètre Poseidon-3B, lancé pour assurer la continuité des satellites TOPEX/Poséidon (1992), Jason-1 (2001) et celle de Jason-2 (2008).
- **SENTINEL-3 (2014)** du programme Copernicus de l'ESA avec trois instruments dont un altimètre nommé SRAL (**Figure 1-3**).

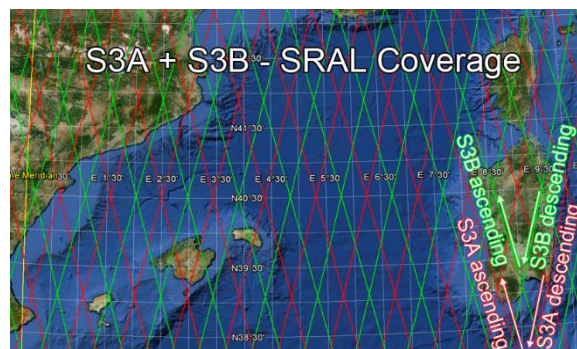


Figure 1-3 : Couverture du satellite SENTINEL-3A (Trace) au-dessus des îles Baléares en mer Méditerranée (Crédit : isardSAT)

1.8.1 Le programme Copernicus

Le programme Copernicus de l'Union européenne fournit des informations sur l'observation de la Terre et se compose de différents services (**Figure 1-4**). Le programme joue un rôle clé dans la production et la distribution des différents produits ECV (Variables climatique Essentielles). Les informations fournies par les différents services Copernicus comprennent des mesures de l'évolution du niveau de la mer à l'échelle mondiale et régionale ainsi que des informations à valeur ajoutée qui contribuent à une meilleure compréhension de la SLR (Sea Level Rise) et à l'adaptation aux impacts associés (**Melet et al., 2021**).

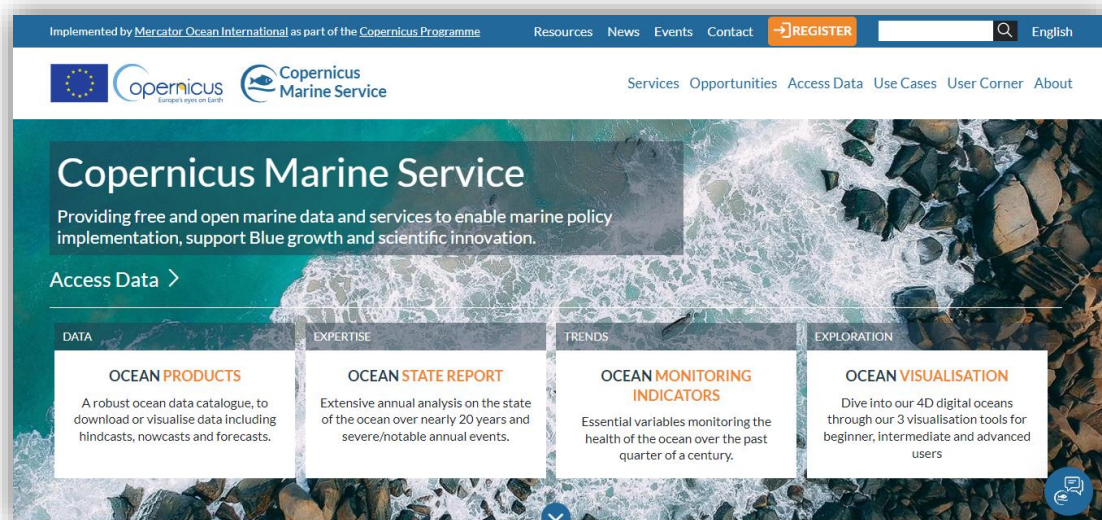


Figure 1-4 : L'interface de programme Copernicus (<https://marine.copernicus.eu/>)

1.8.2 Les services Copernicus

Le programme Copernicus prend en charge le développement et la gestion de six flux thématiques de services :

- Le service de surveillance de l'atmosphère de Copernicus (CAMS).
- Le service Copernicus de surveillance de l'environnement marin (CMEMS)
- Le service Copernicus de surveillance des terres (CLMS)
- Le service Copernicus sur le changement climatique (C3S)
- Le service Copernicus pour les applications de sécurité
- Le service Copernicus de gestion des urgences (Copernicus EMS)

1.8.3 Le service Copernicus de surveillance de l'environnement marin (CMEMS)

Le CMEMS est disponible et opérationnel depuis mai 2015 et est actuellement exploité par Mercator Océan, le Centre français d'analyse et de prévision de l'océan mondial.

Il prend en charge les dernières analyses et prévisions des paramètres océanographiques. Ce service a créé un nouveau saut unique dans l'observation, la compréhension et la prévision des événements dans l'environnement marin. Il fournit régulièrement des informations sur l'état physique, biogéochimique, variabilité et dynamique de l'océan et des écosystèmes marins pour l'océan mondial et les mers régionales européennes.

Les observations et prévisions produites par le service supportent toutes les applications marines : sécurité maritime, ressources marines, environnement côtier et marin ...

Le CMEMS garantit un accès facile aux produits océanographiques grâce à un catalogue en ligne. Les utilisateurs enregistrés peuvent télécharger des produits en fonction de leurs besoins. De plus, même sans inscription, les utilisateurs sont également autorisés à profiter de nombreux services en ligne, tels que : la visualisation du catalogue de produits et l'accès aux informations sur la qualité des produits.

1.8.4 Format des données téléchargées de Copernicus (Format NetCDF) :

NetCDF (Network Common Data Form) est une interface qui donne accès à l'ensemble de données orientées tableau et une bibliothèque qui fournit une mise en œuvre de l'interface. La bibliothèque NetCDF définit également un format indépendant de la machine pour représenter les données scientifique (**Programme Copernicus, 2020**).

Les données NetCDF sont :

- **Autodécrites** : Un fichier NetCDF comprend des informations sur les données qu'il contient.
- **Indépendantes de l'architecture** : Un fichier NetCDF est représenté sous une forme à laquelle peuvent accéder des ordinateurs ayant différentes façons de stocker des entiers, des caractères et des nombres à virgule flottante.
- **Accès direct** : Il est possible d'accéder efficacement à un petit sous-ensemble d'un grand ensemble de données, sans avoir à lire au préalable toutes les données précédentes.
- **Ajoutable** : Les données peuvent être ajoutées à un jeu de données NetCDF le long d'une dimension sans copier le jeu de données ou redéfinir sa structure. La structure d'un jeu de données NetCDF peut être modifiée, bien que cela entraîne parfois la copie du jeu de données.
- **Partageable** : Un écrivain et plusieurs lecteurs peuvent accéder simultanément au même fichier

NetCDF.

1.8.5 Produit CMEMS

Les produits Mercator de surveillance et de prévision des océans sont exploités en routine et en temps réel depuis début 2001. Ils ont été régulièrement mis à niveau en augmentant leur complexité, en élargissant la couverture géographique de régionale à mondiale, et en améliorant les modèles et les schémas d'assimilation (**Lellouche et al., 2013**).

Dans le cadre du service Copernicus de surveillance de l'environnement marin (CMEMS) et depuis le 19 octobre 2016, Mercator a fourni des services quotidiens en temps réel (analyses hebdomadaire et prévisions quotidiennes à 10 jours. La composante modèle est la plate-forme prévisions atmosphériques (**Lellouche et al., 2018**).

- Système global (GLB)
- Système Ibérique Biscaye Irland (IBI)
- Système physique Méditerranée (MED)
- **Système physique Méditerranée (MED)**

MEDSEA_MULTIYEAR_PHY_006_004 Le produit Physical Mediterranean Sea Multiyear comprend 2 jeux de données : une série temporelle de réanalyse couvrant la période de 1987 à un an avant aujourd'hui et un jeu de données intermédiaire (INTERIM) couvrant la période du dernier jour de la réanalyse à un mois avant aujourd'hui.

Le système pluriannuel utilise le modèle NEMO (Nucleus for European Modelling of the Ocean) pour la partie modélisation de l'océan et assimile les profils de température et de salinité in-situ ainsi que les traces altimétriques des satellites avec le schéma 3DVar d'OceanVar et est implémenté dans la mer Méditerranée au $1/24^\circ$ (~ 4.5 km) sur 141 niveaux verticaux.

Le système de réanalyse est forcé par les champs de forçage atmosphérique horaires et assimile les données retraitées, tandis que le système intermédiaire est forcé par les champs de forçage atmosphérique horaires et assimile les observations retraitées.

Le jeu de données réanalyse sera étendu deux fois par an, couvrant la période 1987 jusqu'à 1 an (ou 1,5 an selon la disponibilité des données retraitées) avant le présent. Le jeu de données intermédiaire est initialisé avec le dernier jour disponible de réanalyse et étendu chaque mois jusqu'à 1,5 mois avant le présent.

Il est à noter que les périodes de validation des 2 jeux de données sont différents : le jeu de données de réanalyse est validé sur la période 1987 à 2019, alors que la compétence du jeu de données

intermédiaire est évaluée sur la période janvier à novembre 2020.

Le lien de produit :

https://doi.org/10.25423/CMCC/MEDSEA_MULTIYEAR_PHY_006_004_E3R1

1.9 Les marégraphes

Avant l'apparition du Lidar spatioporté ou aéroporté, le niveau de la mer était mesuré directement en mer grâce aux marégraphes. Le marégraphe est un outil de mesure des variations du niveau de la mer (SSH). Les premiers marégraphes étaient des échelles graduées classiques installées le long des quais, sur lesquelles l'opérateur enregistrerait régulièrement le niveau de l'eau.

Chazellon (Ingénieur hydrographe français) a installé le plus ancien marégraphe du monde dans le port militaire de Brest en 1846. Depuis, avec le besoin croissant de connaissance et de compréhension du milieu marin, de nombreux marégraphes ont été implantés un peu partout dans le monde.

1.10 Indicateur de l'expansion thermique (Hauteur de surface de la mer)

Les scientifiques ont confirmé la validité de l'hypothèse : « avec la dilatation thermique de l'eau, l'élévation du niveau de la mer augmente », non seulement cela, mais l'élévation du niveau de la mer est devenue un indicateur de la dilatation thermique.

Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat avait annoncé que le niveau de la mer monterait à un rythme de 18 à 59 centimètres vers 2100. Néanmoins, l'élévation du niveau de la mer a dépassé les attentes et a été plus rapide de 50%, ce pourcentage a été enregistré dans la période s'étendant entre 1990 et 2001. Tout cela est le résultat de l'augmentation du volume d'eau, qui est également le résultat de la dilatation thermique (**Le Cozannet, 2016**).

L'élévation du niveau de la mer depuis la fin du XIXe siècle est le reflet du réchauffement climatique. D'une part, l'océan se réchauffe et s'étend, d'autre part, le réchauffement climatique accélère la fonte des glaciers de montagne, tandis que les calottes glaciaires de l'Antarctique et du Groenland ont commencé. Au XXe siècle, la dilatation thermique des océans et la fonte des glaciers ont été les principaux facteurs d'élévation du niveau des mers (**Le Cozannet, 2016**).

1.11 Mesure *in situ* en Algérie

Surveiller le niveau de la mer à partir des marégraphes numériques Côtiers (MCN) a permis de donner une image plus claire dans la compréhension des changements qui se produisent au niveau de la mer sur la côte algérienne. Cela a été fait à travers un réseau de six stations marégraphiques permanentes installées le long de la côte Algérienne (**voir Figure I-5**) :

- **Marégraphes électroniques** : réalisés par l'Institut National de Cartographie et de Télédétection (INCT) installés respectivement dans les ports d'Alger, de Jijel et d'Oran.
- **Marégraphes électroniques du SHFN** (Service Hydrographique de la Marine) installés respectivement dans les ports de Ténès, Ghazaouet et Annaba.
- **Marégraphes analogiques** : installés dans les ports d'Alger, Jijel et Oran.

Tableau 1-1 : les marégraphes installés le long de la côte algérienne (source :INCT-SHFN)

Site	Année d'installation
Alger	Depuis 1985 (Analogique)
	Depuis 2011 (Numérique)
Jijel	Depuis 2004 (Analogique)
	Depuis 2012 (Numérique)
Oran	Depuis 2006 (Analogique)
	Depuis 2013 (Numérique)
Ténès	Depuis 2014 (Numérique)
Ghazaouat	Depuis 2015 (Numérique)
Annaba	Depuis 2016 (Numérique)

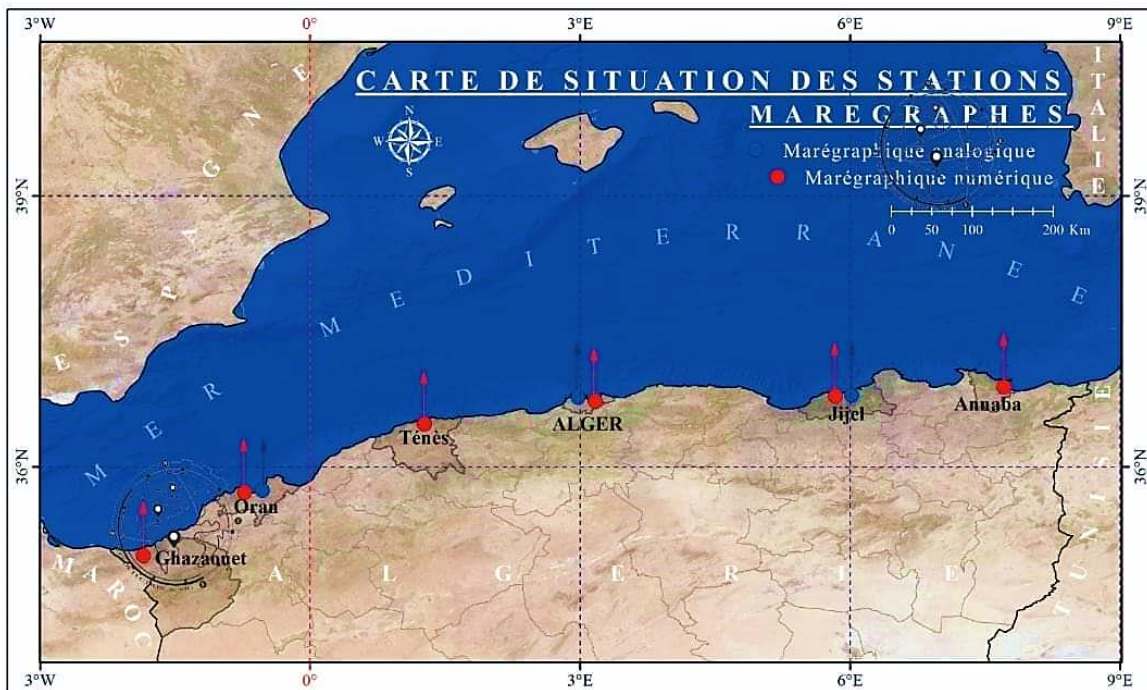


Figure 1-5 : Le Réseau Algérien d'Observations du Niveau de la Mer

Chapitre II :
Contexte Général de la Zone d'étude

2 Contexte général de la zone d'étude

2.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons la zone d'étude et ses différentes caractéristiques.

2.2 La mer Méditerranée

La mer Méditerranée est une mer semi-fermée. Elle est considérée comme une mer récente, plio-quadernaire (5 à 6 millions d'années), constituée dans sa structure actuelle de bassins contigus profonds séparés les uns des autres et de marges continentales faiblement immergées (**Tuel & Eltahir, 2020**).

La mer Méditerranée couvre plus de 2,5 millions de kilomètres carrés et possède sa propre circulation thermohaline, définie comme un océan miniature. Elle sépare les deux continents l'Europe et l'Afrique, se caractérise par deux principaux bassins : le bassin Occidentale et le bassin Orientale. La Méditerranée occidentale est reliée à l'Ouest par le détroit de Gibraltar à l'Atlantique (largeur aux alentours de 14km et environ 300m de profondeur) et à l'Est à la méditerranée orientale par le détroit de Sicile (environ 150km de large et 400m de profondeur) et par le détroit de Marmara à la mer Noire (**Bethox et al., 1999**).

La mer Méditerranée se caractérise par un fort taux d'évaporation, contrairement au taux de précipitations, qui est considéré comme moyen et acceptable dans une certaine mesure. Ce taux est soutenu par le flux des eaux de l'Atlantique à travers le détroit de Gibraltar (75 000 mètres cubes /seconde) et les eaux de la mer Noire à travers la mer de Marmara (6900 mètres cubes/seconde dans le détroit du Bosphore, ce qui signifie qu'au total environ 37 500 km cubes sont renouvelés annuellement, soit un renouvellement total en 95 ans (**Moullec, 2019**).

2.2.1 Bassin occidental

La Méditerranée occidentale couvre une superficie de 0,85 million de kilomètres carrés, soit environ un tiers de la Méditerranée. Fermée sur la plate-forme de l'archipel toscan au Nord, et s'ouvrant au Sud sur le canal de Sardaigne. Au milieu, se trouve le bassin dit "Algéro- Provençal", au-dessus du bassin Algérien (**Douguédroit, 2018**).

Géologiquement, les côtes de la Méditerranée occidentale ont récemment été exposées à l'échelle des temps géologiques à divers actes de sédimentation et d'érosion, et cet acte était lié aux mouvements de la mer et à la montée et à la submersion des terres, qui ont donnés naissance à divers types de côte (**Douguédroit, 2018**).

2.2.2 Bassin Algérien

Le bassin algérien est bordé par le bassin d'Alboran à l'ouest et les marges sarde et tunisienne à l'est, le bassin liguro-provençal au nord et la marge nord-africaine au sud. Il représente la majeure partie du sud-ouest de la Méditerranée, avec une profondeur d'environ 2 600 m, il est considéré comme une zone mixte des eaux de l'océan Atlantique, et est décrite selon comme la zone d'accumulation de mélange et de transformation des eaux de l'océan Atlantique, et sans cette couche superficielle, les veines des eaux intermédiaires coulent vers le centre de la provençale algérienne (**Kumar et al., 2021**).

2.3 Présentation de la zone d'étude :

2.3.1 Le plateau continental algérien

Le littoral algérien avec une longueur de 1622 km se caractérise par un plateau et un talus étroit (2.197 W-8.641 E, 35-37.438 N), avec une largeur variante entre 3 km et 77 km avec une moyenne de 17 km. La profondeur de 100 m est située à moins de 9 km de la côte.

Près de la région du Ténès à l'ouest, ou des régions de la Grande Kabylie et du Collo à l'est, le plateau continental et les pentes disparaissent ou se réduisent à environ 3 km de large. Il s'élargit aux extrémités Est et Ouest de la côte algérienne à proximité de la baie, atteignant 77 km à Ghazaouet et 45 km à la baie de Bou Ismail (**Benzouai et al., 2020b**).

Toutes les caractéristiques de la marge continentale algérienne se retrouvent dans la région d'Alger. La marge continentale des baies de Bouismail, d'Alger et de Zemmouri est nettement étendue. Ces baies sont géographiquement séparées par le massif de Bouzareah et le Cap d'El Masra (**Bakalem, 2008**). Par contre, le plateau est plus développé devant la baie où l'orogénèse est moins active (baie de Bouismail, d'Alger et de Zemmouri) et où se trouve les cours d'eau les plus importants (**CNERU GROUPE, 2006**).

2.3.2 Climat de la zone

Le climat Algérien a tendance à être froid et pluvieux en hivers, les étés sont chauds, les précipitations deviennent rares, et inexistantes dans certaines régions. Il se caractérise par la transition entre le climat subtropical au nord de la Méditerranée et le climat saharien chaud au sud où peu de précipitations se produisent. Le nord de l'Algérie se caractérise par un climat subhumide, alors que dans le Tell Atlas et les Hauts Plateaux le climat semi-aride est dominant, le sud du pays a un climat hyperaride (**Boudrissa et al., 2017**).

2.3.2.1 Les Précipitations

Le pourcentage de précipitations, augmente dans le centre et l'est (600-800 mm/an), contrairement à la partie ouest comme Oran, qui est plutôt moyenne (300-500 mm/an). Cette différence est due aux vents d'ouest et du nord-ouest qui provoquent des précipitations dans la partie nord, où leur quantité dépasse 700 mm dans la bande orientale et dans la région occidentale, les précipitations sont inférieures à 600 mm/an, en raison de la barrière de terrain dans la région de l'Extrême-Maghreb et de la Péninsule ibérique, qui bloque l'arrivée de vents saturés de vapeur d'eau dans la région. La plupart des précipitations annuelles se produisent entre octobre et avril (**Mellah et al., 2019**).

2.3.2.2 La Température

La température est uniforme le long de la côte, où la moyenne journalière du mois d'août est d'environ 26,5 °C /27,8 ° C, et celle de janvier d'environ 11,5° C /12 ° C. La température minimale d'hiver enregistrée est 9°C et la maximale est 15°C, tandis qu'en été la température minimale est 21°C, et la température maximale est 28°C (**Mellah et al., 2019**).

2.3.2.3 Le vent

D'après des notations marines et côtières et des données enregistrées sur plusieurs périodes continues, les vents d'Oran et d'Arzew sont dominants en automne et en hiver par rapport aux vents de Mostaganem et Beni Saf, le long de la bande côtière. Et la direction du vent est perpendiculaire à certains endroits de la côte. La côte peut également être témoin de la présence de vents Sirocco venant du sud de l'Algérie, qui sont chauds et secs et sont plus fréquents en automne et au printemps. En général, la vitesse du vent ne dépasse pas 120 km/h (**Algérie et al., 2022**).

2.3.2.4 L'hydrographie

L'hydrographie algérienne est caractérisée par des vallées fluviales temporaires et permanentes qui se jettent dans la mer, apportant des nutriments, de la matière organique, des sédiments et parfois des polluants chimiques. Les fleuves les plus importants d'ouest en est : Tafna, Chellif, Mazafran, El Harrach, Sebaou, Soumam, El Kebir et Seybouz (**Benzouai et al., 2020a**). La pluviométrie saisonnière dans ces petites rivières est comprise entre 300 et 1200 mm/an, augmentant à un rythme très important d'ouest en est.

Chapitre III :
Matériels et Méthodes

3 Chapitre III : Matériels et Méthodes

Ce chapitre présente les données et le matériel utilisés ainsi que la méthodologie suivie pour réaliser cette étude.

3.1 Données

Nous avons étudié la dynamique de la hauteur de la surface de la mer dans les eaux du plateau continental et du talus algériens en utilisant une série de données de trente-quatre ans. Ce sont des données du niveau L4 issues de plusieurs capteurs multi-sources traitées des données manquantes et contrôlées de la qualité (**Tableau 3-1**). Le produit que nous avons choisi fournit la variable « zos » qui selon les définitions des champs altimétriques correspond à la Surface moyenne de la mer (MSS) ; c'est appelé SSH dans la suite.

Tableau 3-1 : Caractéristiques des données utilisées dans notre étude

Nom du fichier	med_cmcc_ssh_rean_m
Modèle	Numérique
Type de produit	Pluriannuel
Niveau de traitement	L4
Résolution spatiale	0,042° × 0,042°
Couverture verticale	De -5500 à 0 (141 niveaux)
Système de référence de coordonnées	WGS 84 (EPSG 4326)
Couverture temporelle	16/01/1987 au 16/05/2020
Résolution temporelle	Moyenne mensuelle
Format de fichier d'origine	NetCDF-4

3.2 Matériels

Dans ce travail, nous avons utilisé trois logiciels pour le traitement de nos données dont un logiciel de traitement d'images satellitaires SeaDAS, un logiciel de SIG et un tableur.

3.2.1 SeaDAS

SeaDAS (SeaWIFS Data Analysis System) est un logiciel développé par la NASA pour le traitement, l'affichage et l'analyse des données océaniques provenant de capteurs satellites. Nous l'avons choisi pour sa convivialité et la puissance de ses outils notamment dans le calcul des statistiques en donnant des valeurs précises en peu de temps (**Mitsuhiro, 2015**).

3.2.2 ArcGIS

ArcGIS est un système complet de collecte, d'organisation, de gestion, d'analyse, de communication et de diffusion d'informations géographiques. En tant que principale plate-forme mondiale pour le développement et l'utilisation de systèmes d'information géographique (SIG). Nous l'avons utilisé pour la production cartographique.

3.2.3 Excel

Microsoft Excel est un logiciel tableur issu de la suite bureautique Office 365. Il se présente sous forme de tableaux structurés en lignes et en colonnes dans des onglets séparés appelés feuilles de calculs. Il intègre des fonctions de calcul numérique, de représentation graphique, d'analyse de données, de programmation et détient son propre langage. Nous l'avons utilisé pour l'organisation des données.

3.3 Méthodes

La méthodologie suivie dans notre étude est basée sur le traitement des données de la SSH après les avoir téléchargées et de la SST. Extraire les statistiques zonales (toutes les régions et le Shelf qui est la moyenne des six régions) mensuelles, annuelle. Puis calculer les climatologies, les anomalies standardisées et les variabilités saisonnières afin de réaliser les graphiques. Enfin, pour l'analyse statistique, nous avons effectué différents tests tel que : le test de normalité, de tendance pour mieux savoir la distribution des données et le test de corrélation.

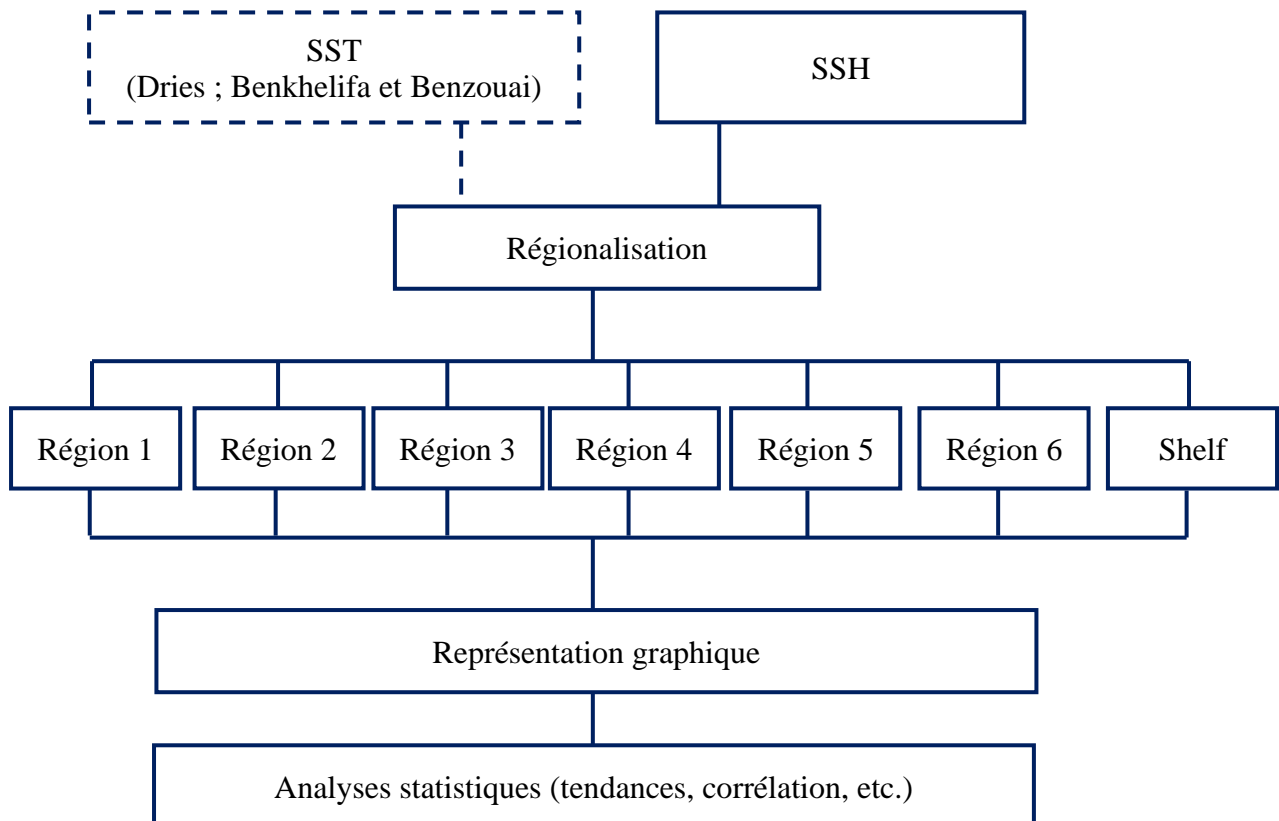


Figure 3-1: Méthodologie suivie dans notre étude

3.3.1 Régionalisation de la zone d'étude

Dans notre étude, nous adoptons la régionalisation proposée par **Benzouai et al (2018)**, qui est basée sur la subdivision des eaux du plateau continental algérien en six (6) régions. Ces eaux sont délimitées par une courbe bathymétrique de 1000 mètres au nord définissant les eaux continentales et par le littoral au sud. La sélection des limites est et ouest coïncide avec les limites météorologiques océaniques ; ce choix est fait parce que le temps océanique a un effet sur la circulation et donc sur la biomasse marine, et parce que chaque zone proposée est délimitée par au moins un oued important (**Tableau 3-2**).

Tableau 3-2 : Les délimitations géographiques des six régions proposées.

Nom	Limites géographiques	Désignations
Région 1	-2°.197 W ; -0°.931W	Ghazaouat – Oran
Région 2	-0°.931 W ; 1°.369 E	Oran – Ténès
Région 3	1°.369 E ; 3°.078 E	Ténès - Alger
Région 4	3°.078 E ; 5°.109 E	Alger – Béjaïa
Région 5	5°.109 E ; 6°.248 E	Béjaïa – Skikda
Région 6	6°.248 E ; 8°.641 E	Skikda – El Kala

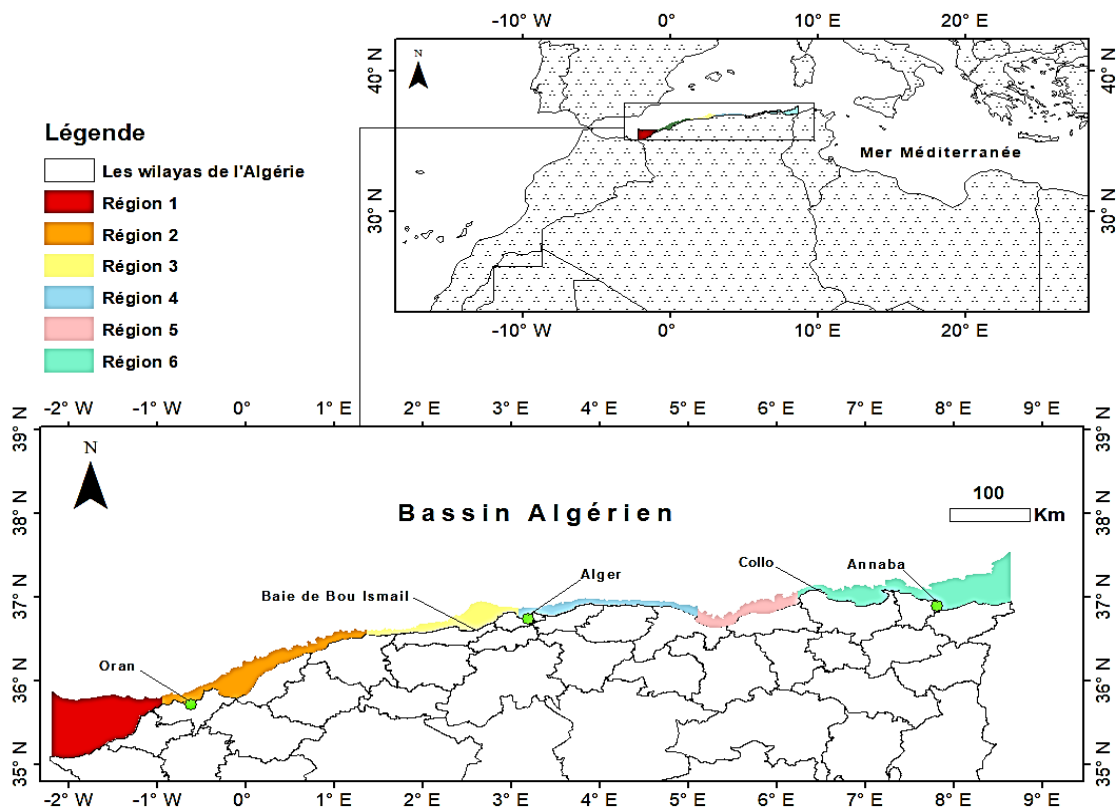


Figure 3-2 : Plateau continental Algérien. Les six régions proposées (R1-R6)

3.3.2 Téléchargement des données

Le téléchargement s'est effectué selon les étapes suivantes (**Figure 3-2**) :

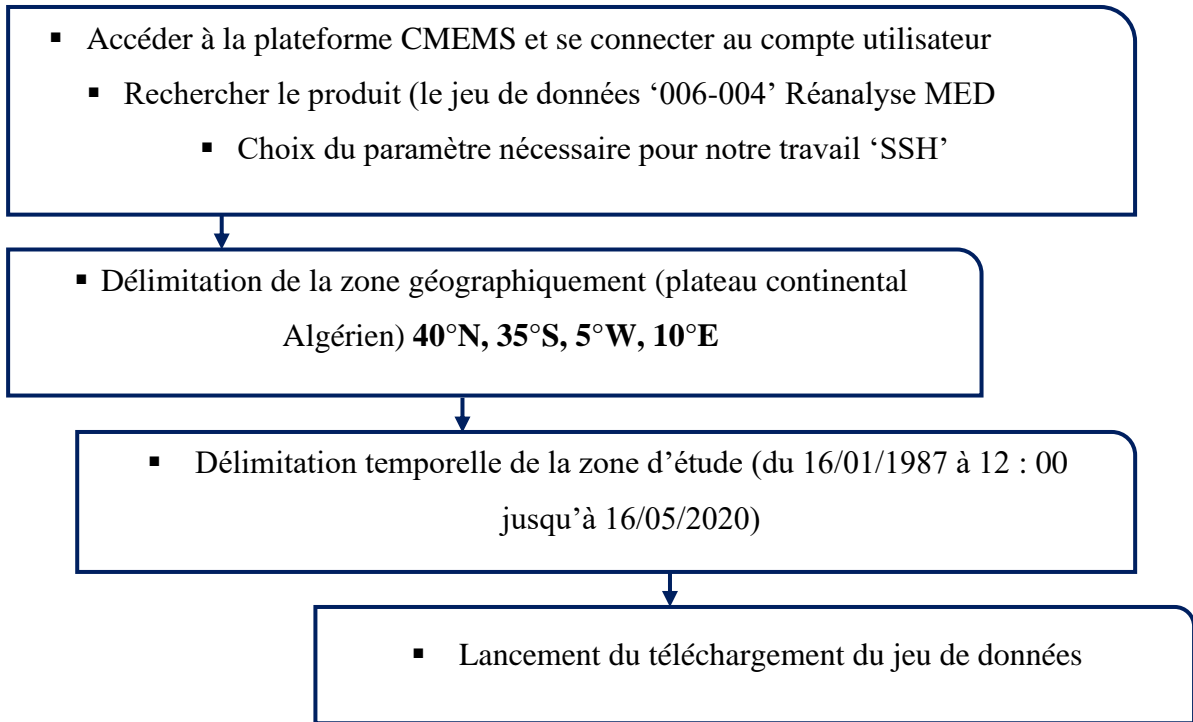


Figure 3-3 : Etapes de téléchargement des données NetCDF nécessaire pour l'étude depuis la plateforme Copernicus Marine Service

3.3.3 Extraction des statistiques :

L'extraction des statistiques zonales (Médiane, percentile 25 et percentile75) s'est faite pour chaque région et pour la totalité des eaux du plateau continental et du talus. Ces statistiques ont permis la représentation graphique des variabilités de la variable zos.

3.3.4 Prétraitement

Après l'acquisition des données, vient l'étape des prétraitements afin de construire les séries temporelles.

Les différents calculs effectués :

- **Les écarts-types** selon l'équation suivante :

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3-1)$$

Où : σ : écart-type

X_i : SSH moyennes pendant l'année j

\bar{X} : SSH moyenne (cm) correspondant à la longueur de la série.

n : longueur de la série.

- Les climatologies moyennes mensuelles :

Ce définie comme la moyenne des SSH moyenne de l'année i et du mois m allant de 1987 à 2019, divisée par 12. Elle est calculée comme l'équation l'indique :

$$\begin{aligned} XC_1(\mathbf{1}, x) &= \frac{\sum_{y=1}^n X1_y(\mathbf{1}, x)}{n} \\ &\vdots \\ XC_{12}(\mathbf{12}, x) &= \frac{\sum_{y=1}^n X12_y(\mathbf{12}, x)}{n} \end{aligned} \quad (3-2)$$

Où : XC_m : SSH (cm) / SST (°C) moyenne climatologique mensuelle.

X_{my} : SSH (cm) / SST (°C) correspondant à l'année y et le mois m .

N : nombre d'années

- Les anomalies standardisées :

Calculée à partir des climatologies moyennes annuelles soustraites des hauteur moyenne de l'année i , divisées par l'écart-type. Selon l'équation qui suit :

$$SSH_a = \left(\frac{Xy - XCm}{\sigma} \right) \quad (3-3)$$

Où :

X_m : SSH (cm) / SST (°C) moyenne de la série sur l'échelle temporelle considérée.

X_y : SSH (cm) / SST (°C) moyenne de l'année Y ou du mois m selon l'échelle temporelle considérée.

σ : écart-type.

- Les variabilités saisonnières :

$$X_{ijk} = \sum_{n=1}^k X(n, m) \quad (3-4)$$

Où :

X_{ijk} : variabilité saisonnière

$X(n, m)$: cumul du mois

n : mois de la saison

3.3.5 Les tests statistiques :

Le test statistique est une approche visant à fournir une base de décision qui permet, sur la base des résultats d'un échantillon, de choisir entre deux hypothèses statistiques.

1- Test de normalité

Un test de normalité est utilisé pour vérifier si les données suivent une loi normale ou non. L'un des cas particuliers des tests d'adéquation est le test de normalité, Il est nécessaire de vérifier la normalité avant d'utiliser les tests.

Nos données suivent-elles la loi normale ?

Déroulement du test de normalité sous Excel :

Depuis la barre de menu, cliquer sur « Data », puis depuis l'onglet « Data », cliquer sur « Data Analysis », Ensuite, choisir « Descriptive Statistics », puis une fenêtre apparaît dans laquelle il faut saisir les entrées, qui sont les séries de données à travers lesquelles nous voulons effectuer le test de normalité, ainsi que les sorties (l'une des colonnes vides dans la feuille Excel), puis appuyer sur OK et obtenir un tableau de résultats.

Interprétation des résultats du test de normalité

a- A partir de l'asymétrie et l'aplatissement

Pour interpréter les résultats, nous prenons en compte à la fois l'asymétrie « Skewness » et l'aplatissement « kurtosis », sachant que, la distribution normale a une asymétrie de zéro et un aplatissement de trois. Le test est basé sur la différence entre l'asymétrie des données et zéro et l'aplatissement des données et trois :

- **L'asymétrie** : L'asymétrie, en statistique, est le degré d'asymétrie observé dans une distribution donnée.

Les distributions peuvent présenter une asymétrie à droite (positive) ou à gauche (négative) à des degrés divers. Une distribution normale (courbe en cloche) présente une asymétrie nulle.

- **L'aplatissement** : Comme l'asymétrie, l'aplatissement est une mesure statistique utilisée pour décrire la distribution.

Il existe trois catégories d'aplatissement qui peuvent être affichées par un ensemble de données. Toutes les mesures d'aplatissement sont comparées à une distribution normale standard, ou une courbe en cloche.

- **Méso Kurtique** (aplatissement = 3,0)

La première catégorie d'aplatissement est une distribution mésokurtique. Cette distribution a une statistique d'aplatissement similaire à celle de la distribution normale.

- **Lepto Kurtique** (aplatissement > 3,0)

La deuxième catégorie est une distribution leptokurtique. Toute distribution leptokurtique affiche un aplatissement plus important qu'une distribution mésokurtique.

- **Platy Kurtique** (aplatissement < 3,0)

Le dernier type de distribution est une distribution platykurtique. Une distribution statistique dans laquelle la valeur d'aplatissement en excès est négative.

b- A partir de la boîte à moustache

Indépendamment des statistiques, la boîte à moustache permet de visualiser rapidement la symétrie de la distribution des données, la boîte montre que les données suivent une loi normale, si la moyenne est nulle.

Ce test a été appliqué à toutes nos données : saisonnières, climatologie, mensuelle et les variabilités interannuelles.

2- Test d'autocorrélation (test de J.Durbin et G.Watson)

Le test de Durbin-Watson a été développé par J.Durbin et G.Watson (1950, 1951), il est utilisé pour détecter l'autocorrélation entre les résidus de la régression linéaire. Le résultat du test de Durbin-Watson varie de 0 à 4.

Ce test est considéré comme standard car à travers ses résultats, un test spécifique tel que le test

de Mann -Kendall peut être fait ou non.

3- Le test de Mann Kendall :

La condition d'exécution de ce test est que les données ne soient pas auto-corrélées, ce qui a été confirmé avant, par le test de Durbin –Waston.

Le test de tendance de Mann Kendall (parfois appelé test M-K) est utilisé pour analyser les données collectées au fil du temps pour les tendances croissantes ou décroissantes des valeurs Y. Il s'agit d'un test non paramétrique, ce qui signifie qu'il fonctionne pour toutes les distributions (c'est-à-dire que même si les données ne suivent pas une loi normale) (**Drouiche et al., 2019**).

Chapitre IV :
Résultats et Discussions

4 Chapitre IV : Résultats et Discussions

4.1 Introduction

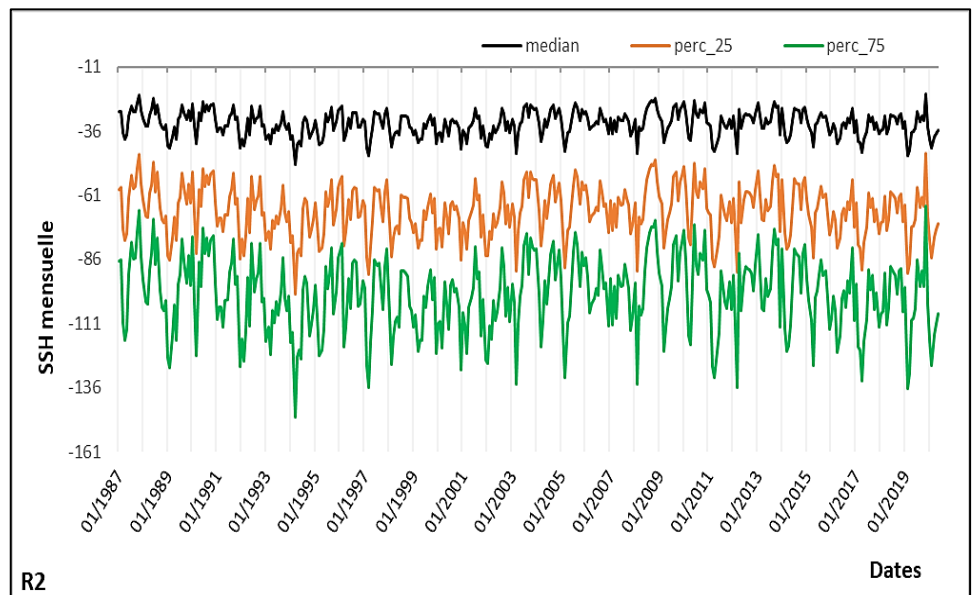
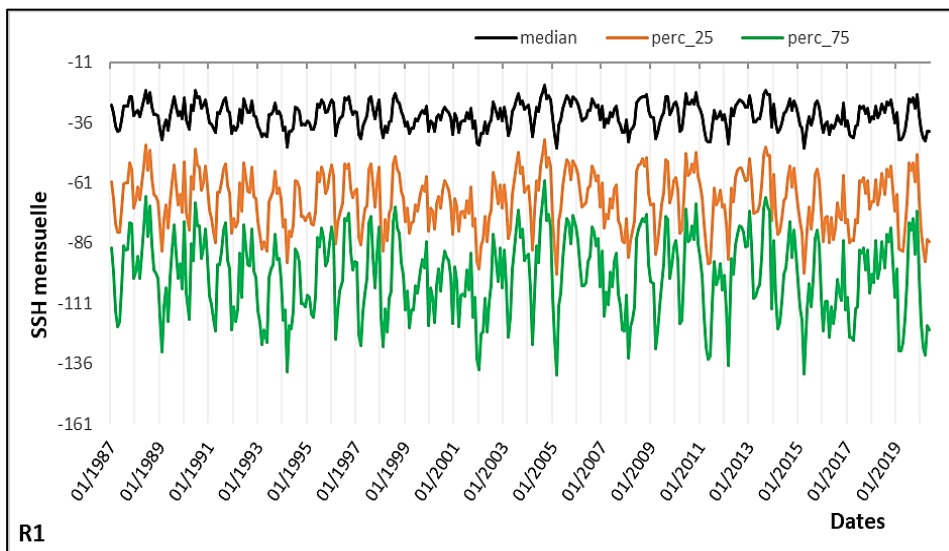
Dans ce chapitre, nous présentons les différents résultats obtenus après traitement et analyse des données. Ces résultats concernent les variabilités mensuelles, annuelles, climatologiques, saisonnière et les anomalies le long des six régions du plateau continental et du talus algériens.

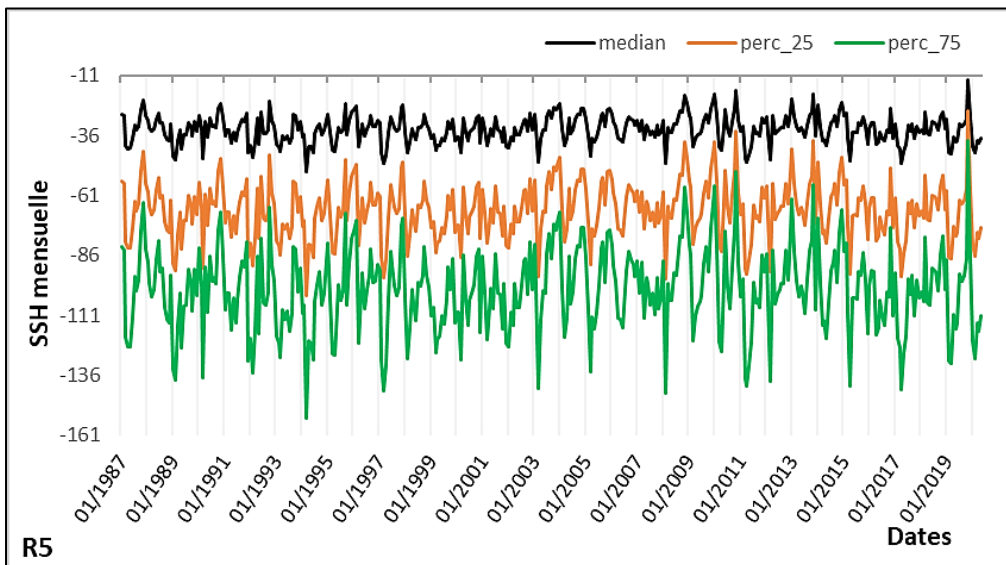
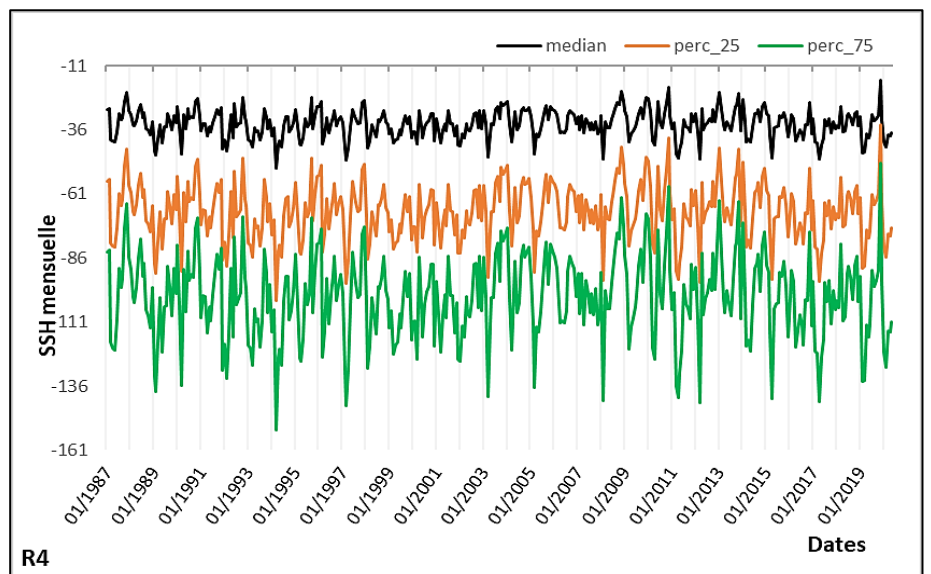
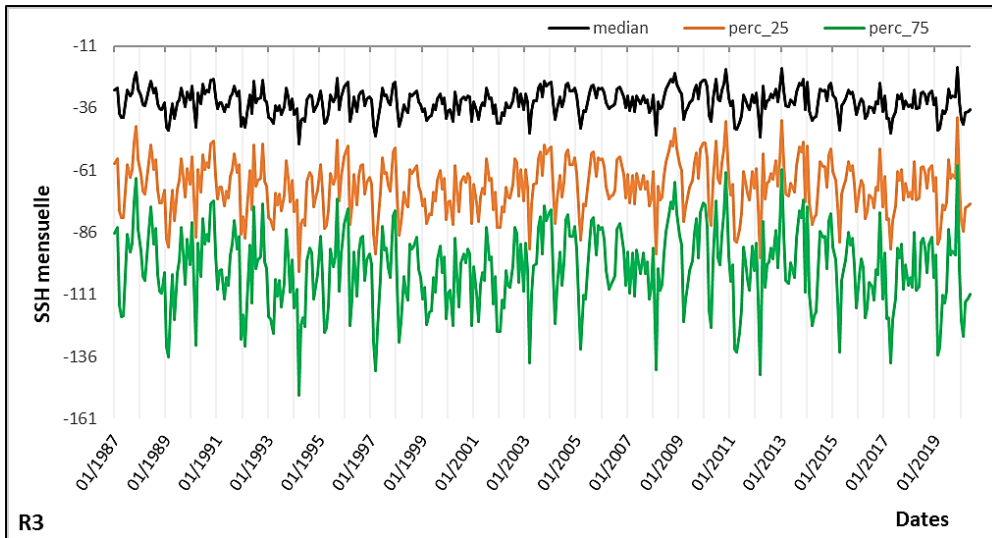
Le but tracé dans cette section est de suivre l'évolution de la SSH au cours des 34 ans d'étude.

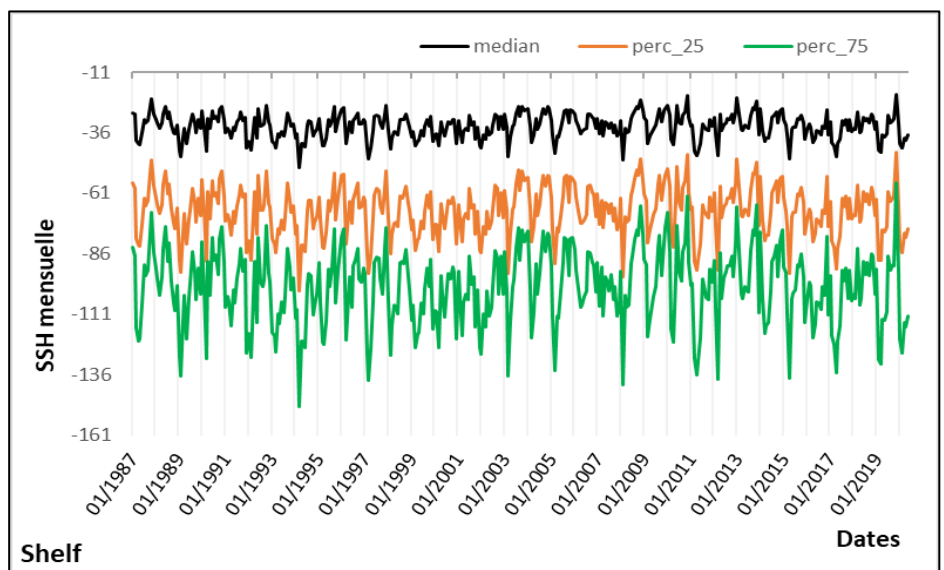
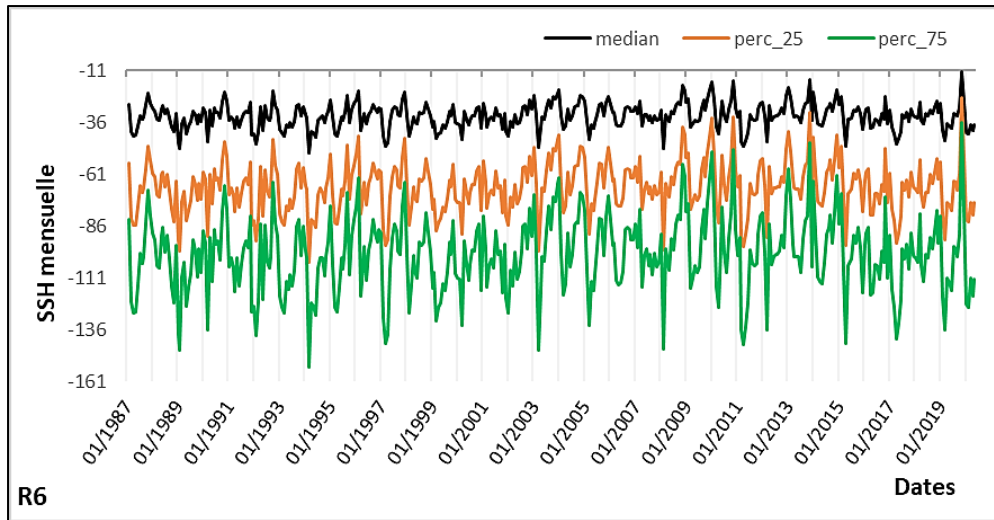
4.2 Les variabilités mensuelles

Les graphiques dans la (**figure 4-1**) représentent les variations mensuelles de la SSH en (cm)

Nous observons les résultats des graphiques en forme cyclique à l'échelle de toutes les régions ainsi que pour le shelf (la moyenne des six régions)







*Figure 4-1 : Variabilités mensuelles des hauteurs de la surface de la mer (01/1987 - 05/2020).
Région (R1-R6) et le shelf*

Analyse des graphes :

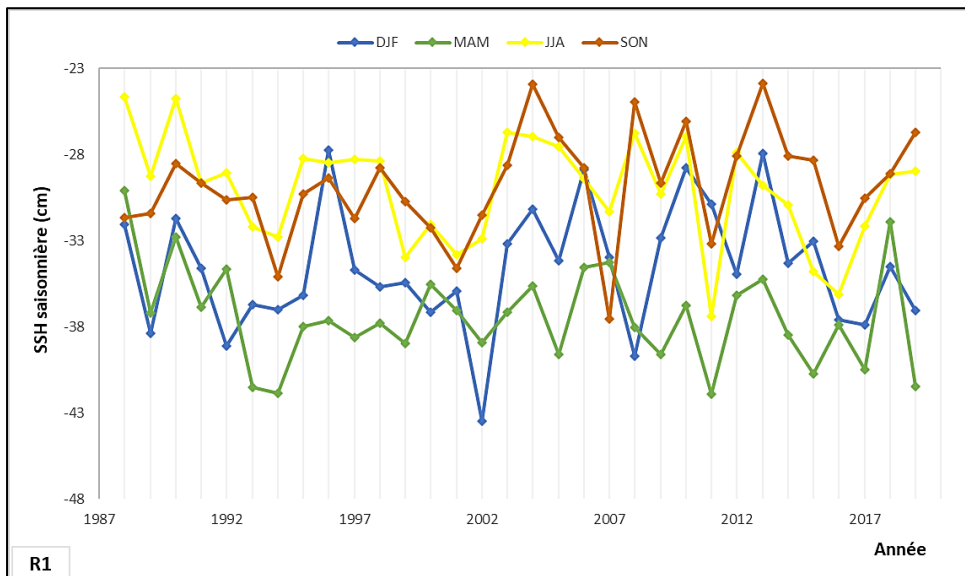
L’observation des variabilités mensuelles de la SSH, montre une augmentation progressive de la région (2-6) allant de 03/1994 jusqu’à 11/2019. Contrairement à la région (1) qui a connu une légère diminution du niveau de la mer. Voir **tableau (4-1)**

L’explication qu’on peut proposer concernant l’augmentation des moyennes mensuelles de la SSH est que la première rupture de la variable SST était enregistrée au début de l’année 1994 ; ce qui a induit à l’élévation de niveau de la hauteur de la mer enregistrés dans plusieurs régions du monde.

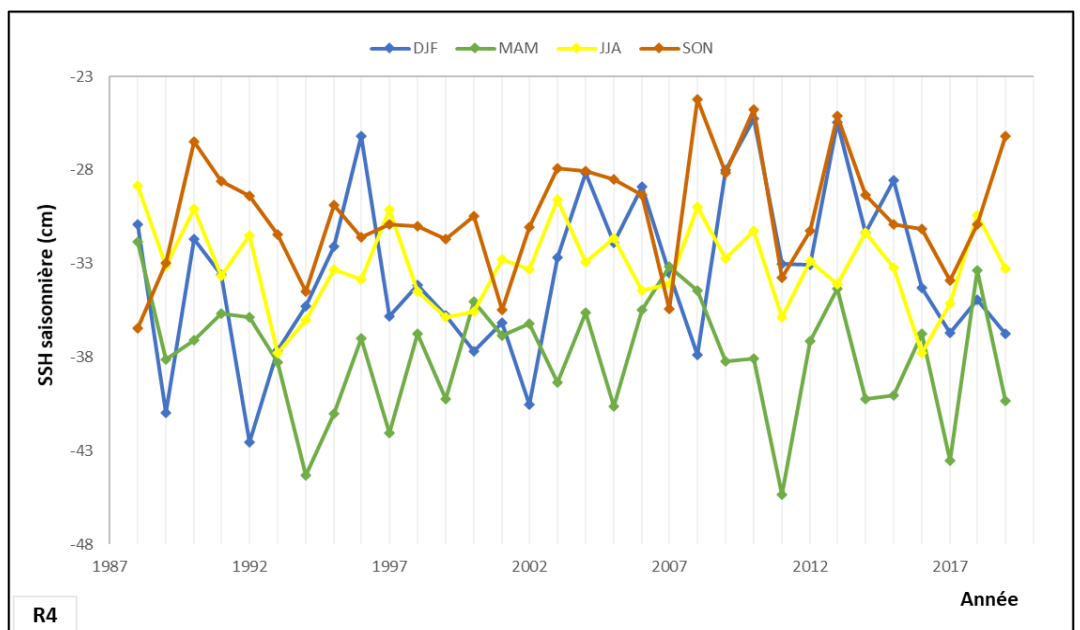
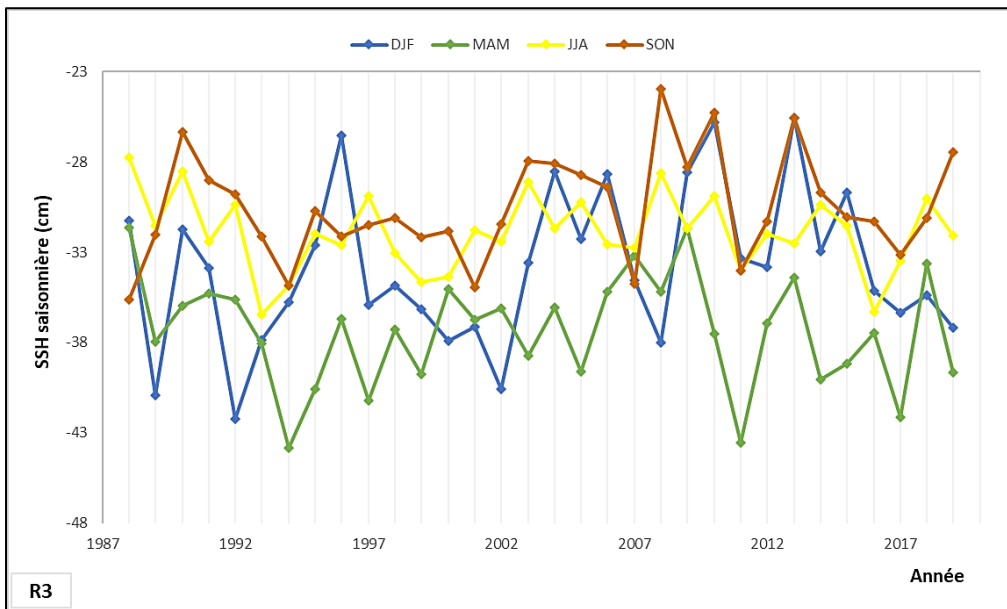
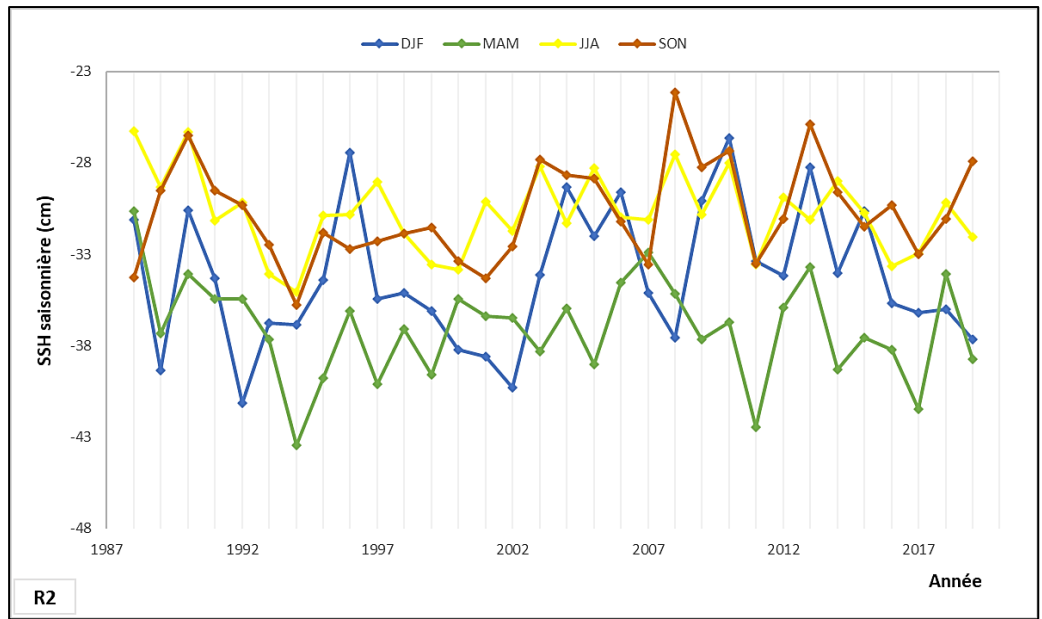
Tableau 4-1 : Pics des SSHs mensuelles (1994-2019) le long des eaux du plateau algérien

Régions	Pics(cm) supérieurs (max)	Mois-Année	Pics(cm) inférieurs (min)	Mois-Année
R1	-20,46	09/2004	-46,77	03/2005
R2	-21,65	11/2019	-49,2	03/1994
R3	-19,63	11/2019	-50,47	03/1994
R4	-16,68	11/2019	-51,01	03/1994
R5	-12,77	11/2019	-51,28	03/1994
R6	-11,98	11/2019	-51,07	03/1994
Shelf	-20,24	11/2019	-50,32	03/1994

4.3 Les variabilités interannuelles saisonnières



Chapitre IV : Résultats et Discussions



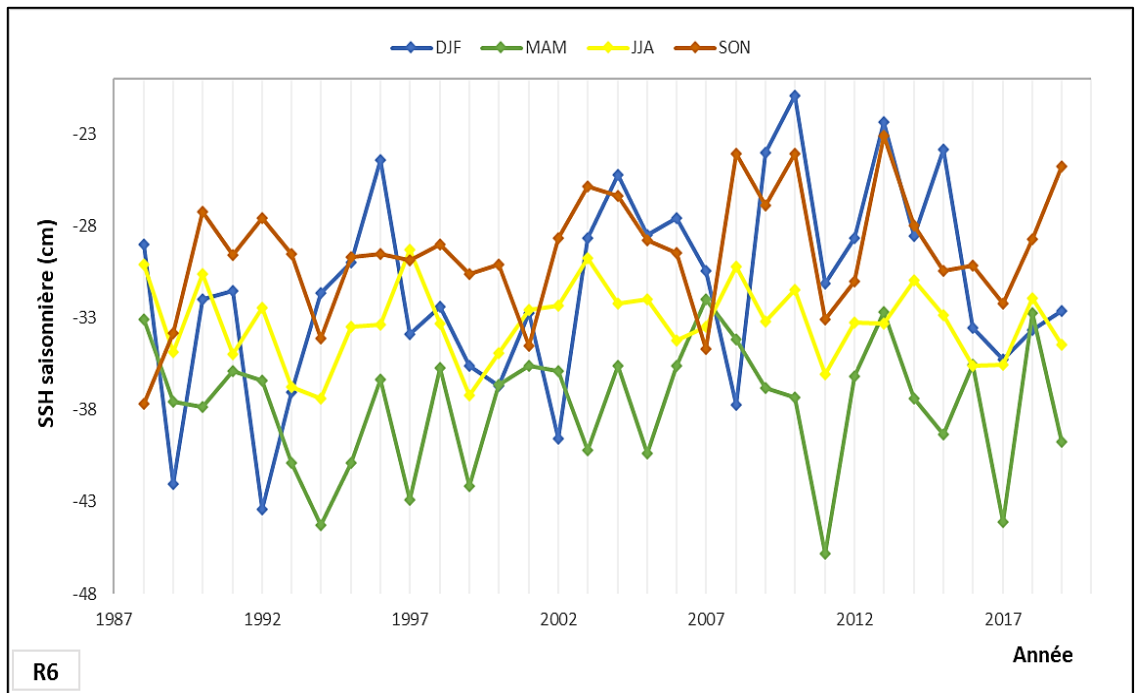
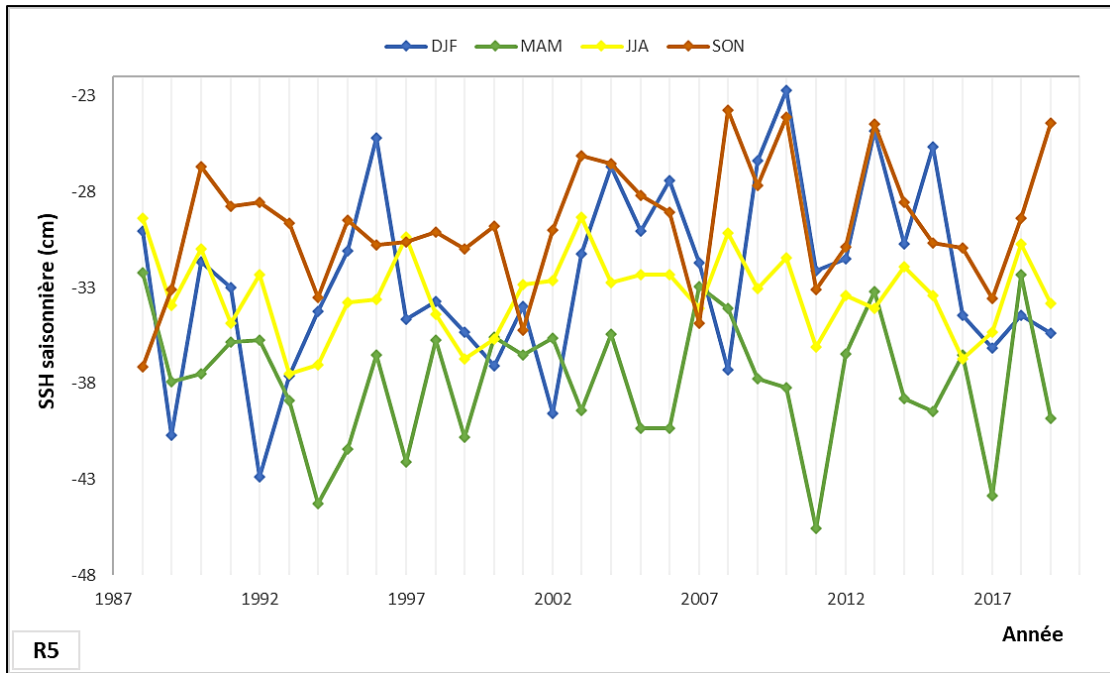


Figure 4-2 : Variabilité interannuelle des SSHs saisonnières (1987-2019) le long des six régions du plateau continental. Les couleurs bleu, vert, jaune et marron représentent respectivement les saisons de l'hiver, du printemps, de l'été et de l'automne.

Les graphes (**Figure 4-2**) représentent la variabilité saisonnière de la SSH en centimètres dans une période de 33 ans (1987-2019) dans chacune des régions du littoral algérien (1-6).

Les régions de 1 à 4 connaissent les valeurs les plus élevées de la SSH pendant la saison

de l'automne" SON" alors que les pics dans les régions (5-6) se produisent pendant la saison hivernale "DJF" (voir tableau 4-2).

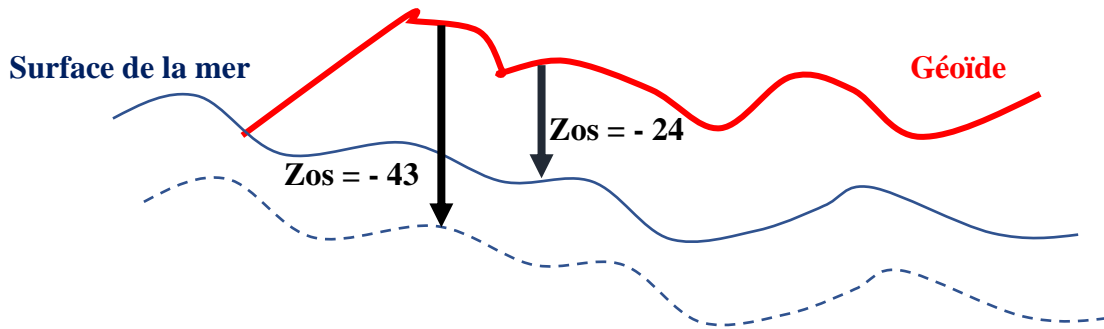


Figure 4-3 : schéma explicatif de la dynamique de la SSH (variable Zos)

Tableau 4-2 : Pics saisonnier de la SSH (1987-2013)

Régions	Pics(cm) supérieurs	Saisons	Année	Pics(cm) inférieurs	Saisons	Année	Amplitude
R1	-23.84	SON	2013	-43.49	DJF	2002	19,65
R2	-24.14	SON	2008	-43.44	MAM	1994	19,30
R3	-23.93	SON	2008	-43.84	MAM	1994	19,91
R4	-24.21	SON	2008	-45.32	MAM	2011	21,11
R5	-22.70	DJF	2010	-45.55	MAM	2011	22,85
R6	-20.93	DJF	2010	-45.84	MAM	2011	24,91

D'autre part, nous constatons que la valeur la plus faible est toujours enregistrée en saison printanière "MAM" pour chacune des régions 2 à 6 alors que pour la région 1, la valeur la plus faible a été enregistrée en saison hivernale "DJF" .

Grâce à l'analyse préliminaire, nous observons une fluctuation et une instabilité dans la variabilité saisonnière de la SSH. Néanmoins, son amplitude varie entre 19 et 25 cm selon un gradient croissant de l'ouest vers l'est (R1-R6). Par ailleurs, nous observons que les valeurs les plus importantes dans les années de 1987 à 2002 et ce, dans toutes les régions.

Interprétation :

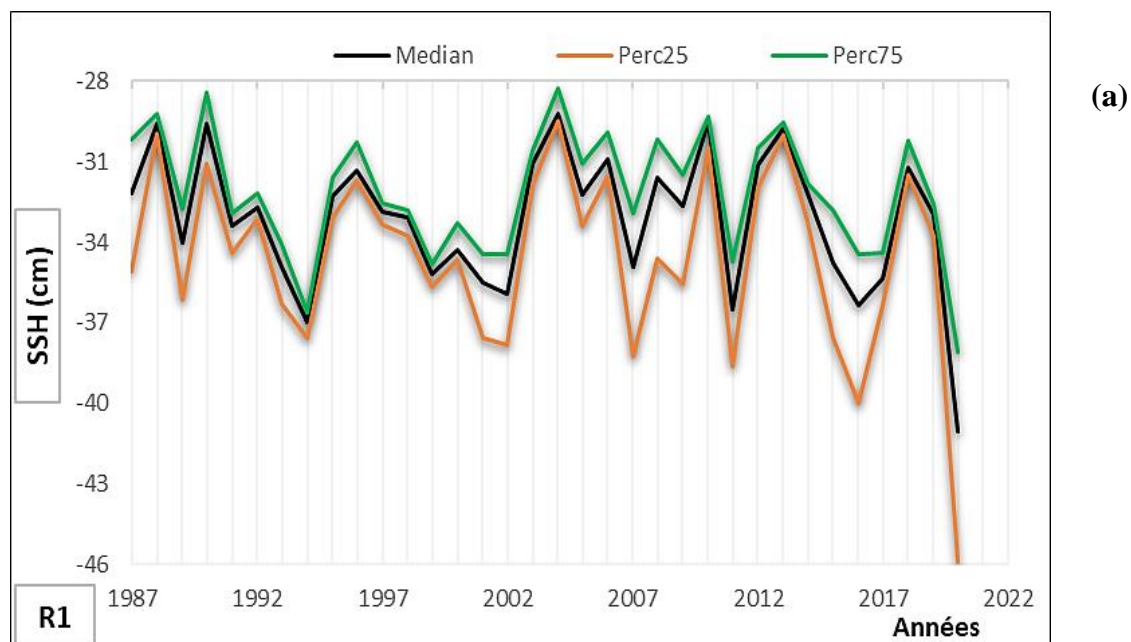
Les valeurs maximales enregistrées dans chacune des régions du R1 au R4 de la saison d'automne,

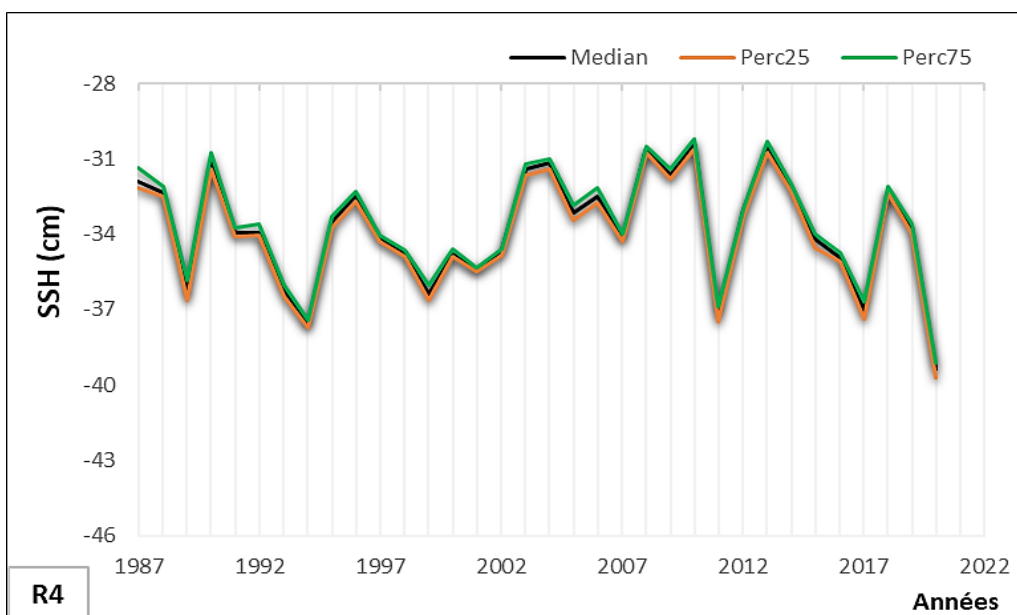
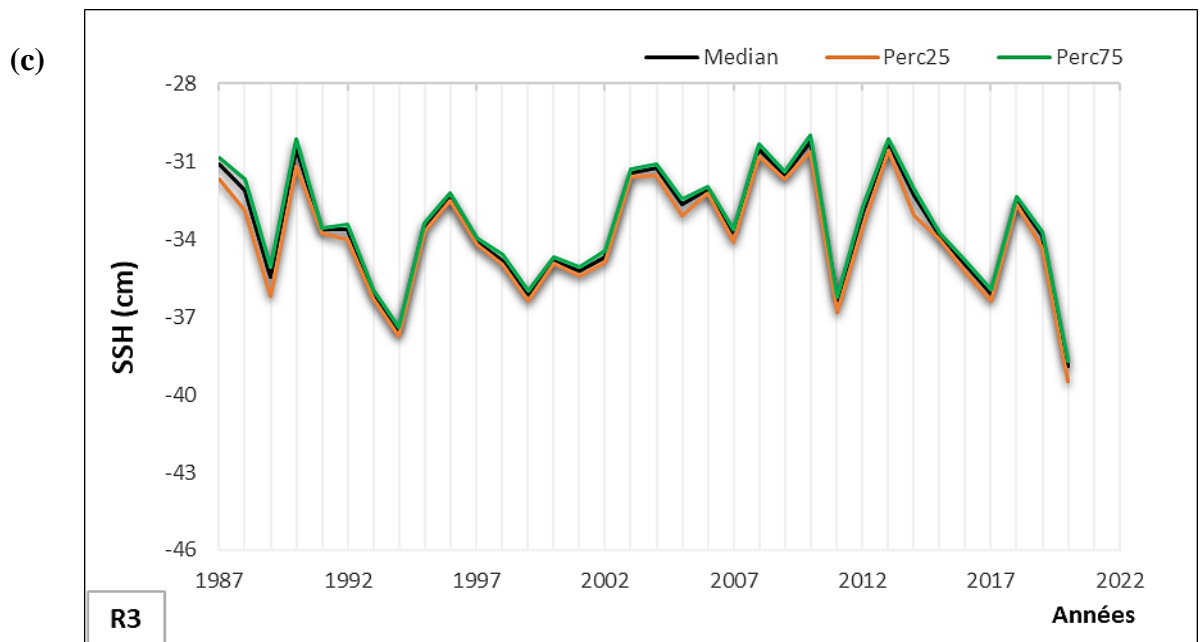
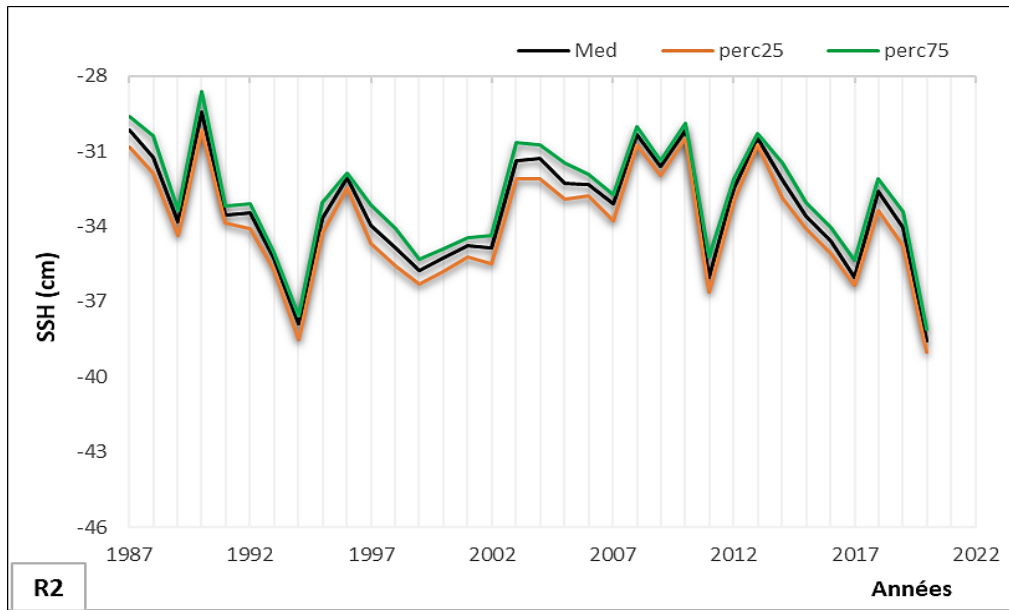
en raison du début des précipitations, ce qui entraîne une augmentation des valeurs SSH. Mais les plus grandes valeurs ont été enregistrées dans chacune des quatrième et cinquième région, c'est-à-dire du centre à l'est, en raison de la différence de pourcentage de précipitations, qui est importante par rapport à l'ouest.

En ce qui concerne les changements instables de SSH en toutes saisons dans toutes les régions revient à la fluctuation de la SST et des précipitations irrégulières en petites quantités à chaque saison.

On constate, à partir de l'année 2002, que les évolutions des SSH sont fluctuantes, mais les valeurs sont importantes par rapport aux années de 1987 à 2002 dans toutes les régions, et cela est dû à l'impact des changements climatiques globaux qui ont également affecté la Côte algérienne, qui comprend notre zone d'étude.

4.4 Les variabilités interannuelles





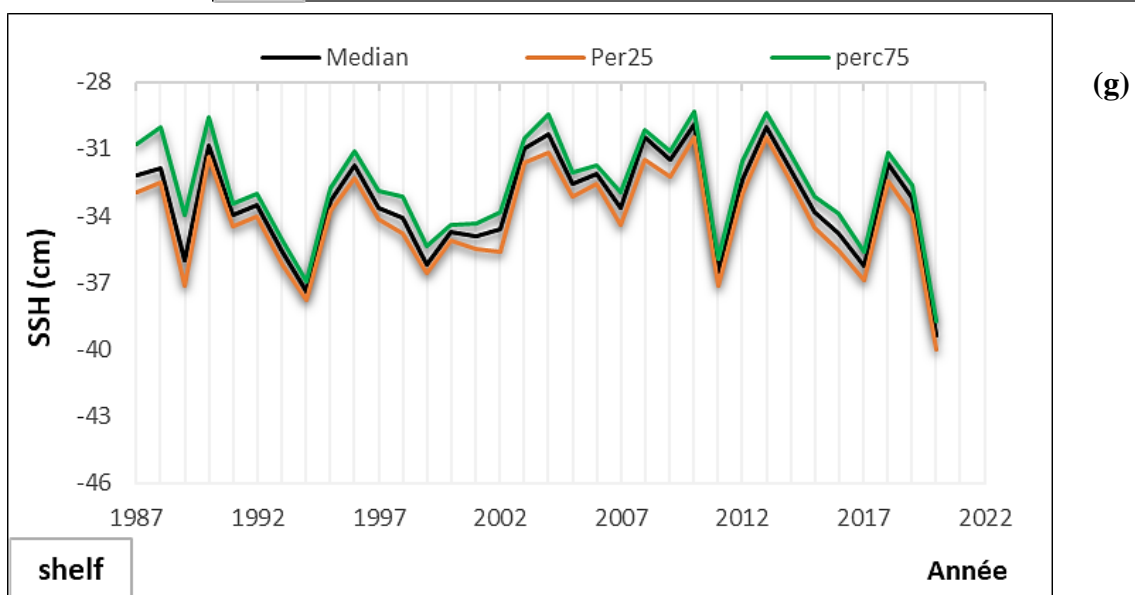
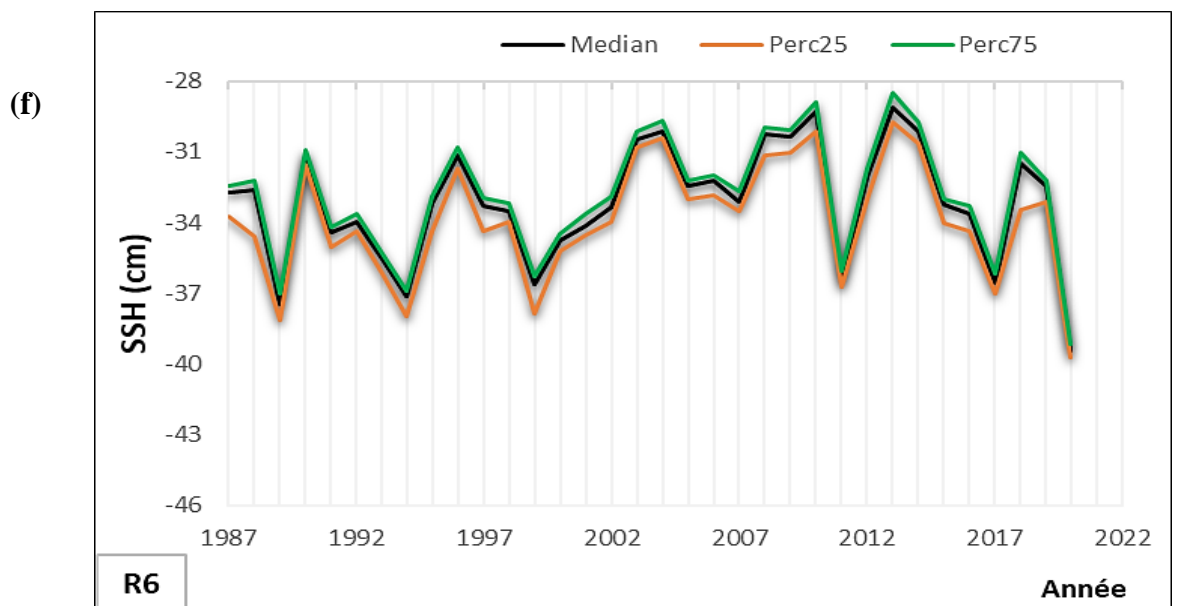
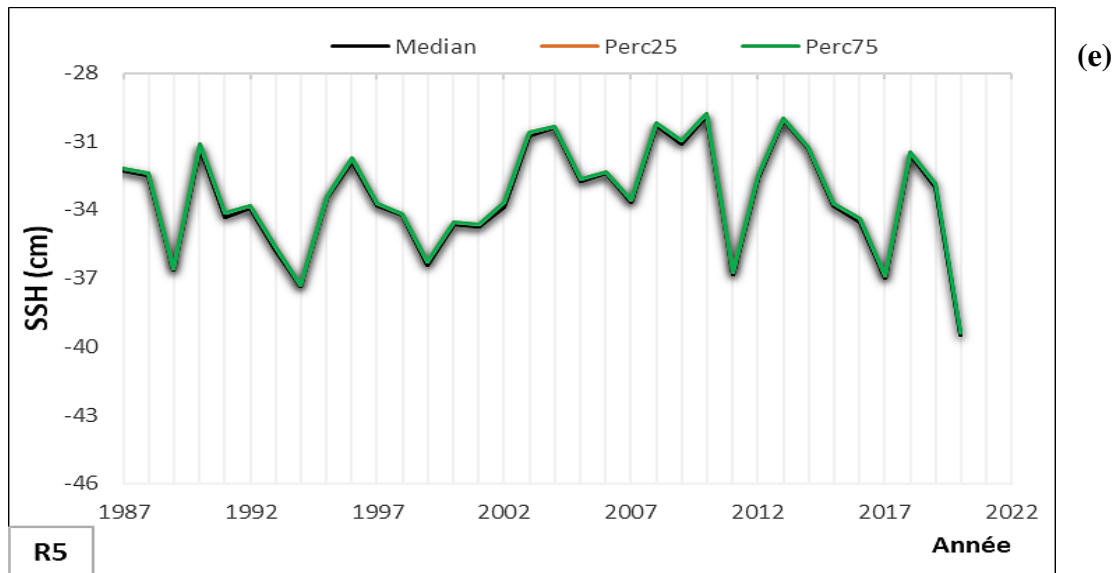


Figure 4-4 : Variabilités interannuelles des SSHs des six région (1-6) et le shelf (a-g) respectivement

Analyse des graphes :

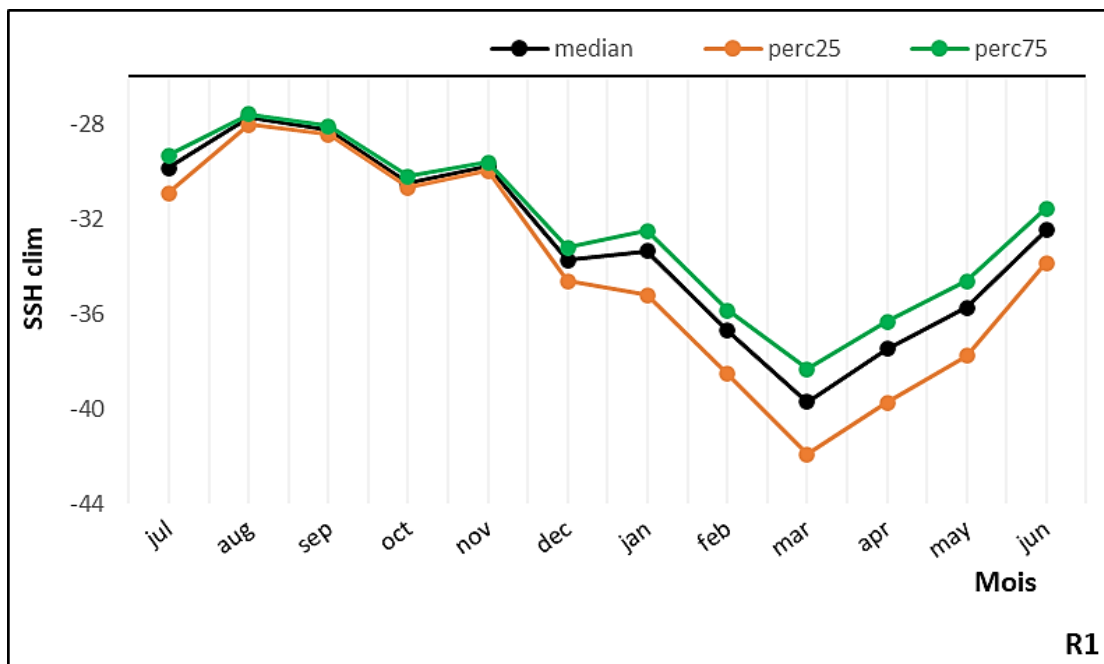
Les graphiques représentent la variation interannuelle de la SSH.

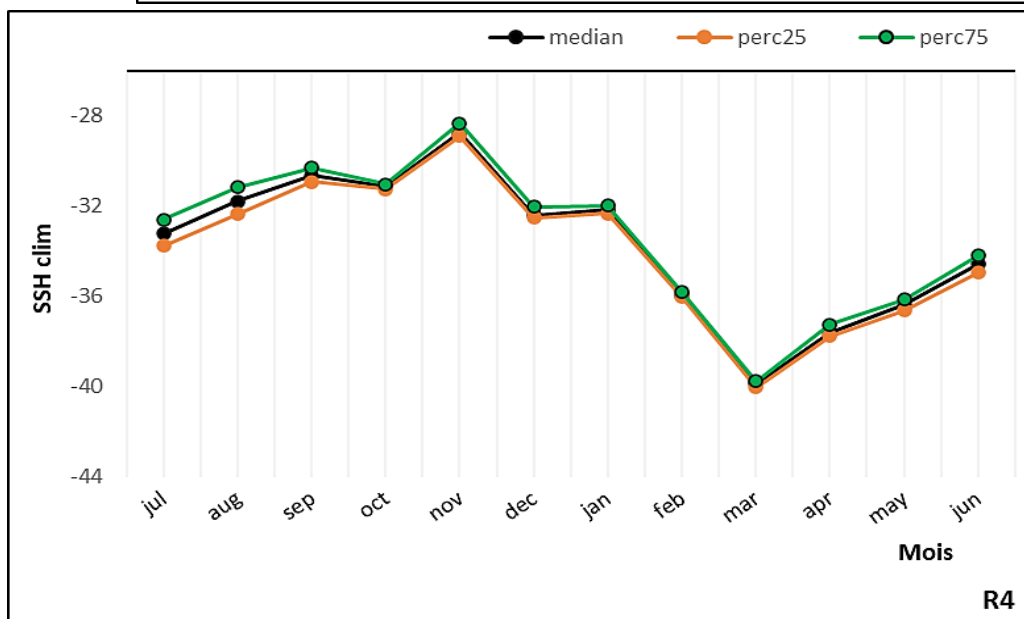
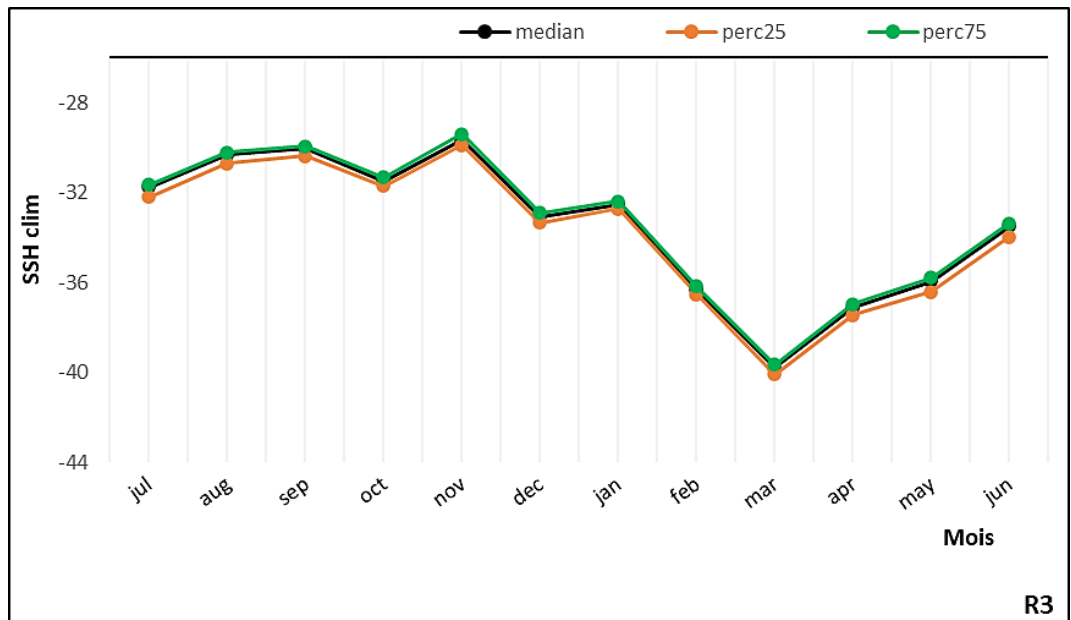
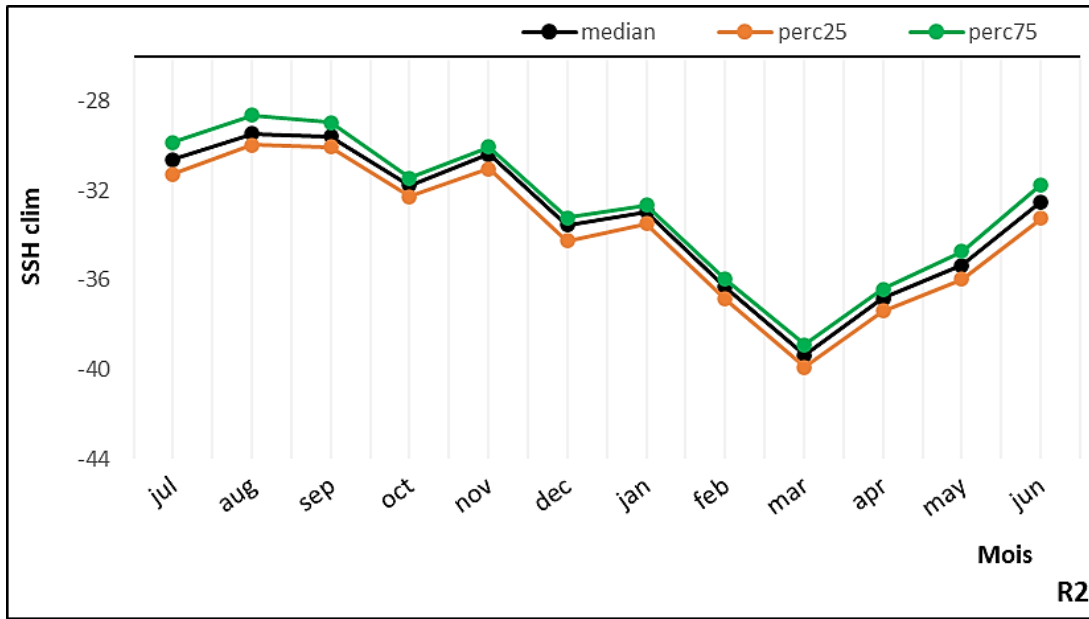
Nous observons la même variabilité dans toutes les régions et à l'échelle du shelf également. Nous remarquons qu'à partir de l'année 1990, les valeurs à la fois de la médiane et du perc 25 et perc 75 sont en augmentation et toutes les valeurs sont dans une tendance ascendante à quelques exceptions près.

Interprétation :

L'augmentation de la moyenne annuelle de la SSH dans la zone d'étude à partir de 1990 est probablement due au fait que les années 90 correspondant à la première rupture dans l'augmentation de la SST le long des eaux algériennes (Benzouai et al., 2022). Le réchauffement du système climatique a provoqué une élévation du niveau mondial de la mer par l'expansion thermique et la perte de glace sur terre due au réchauffement des océans, Sachant que, environ 58% de l'élévation du niveau de la mer provenaient de l'expansion thermique entre 1990 et 2018, tandis que la fonte des glaciers a contribué à 24%, les calottes glaciaires à 20%. Tous ces éléments ont affecté la mer Méditerranée et ont affecté notre zone d'étude.

4.5 Climatologie





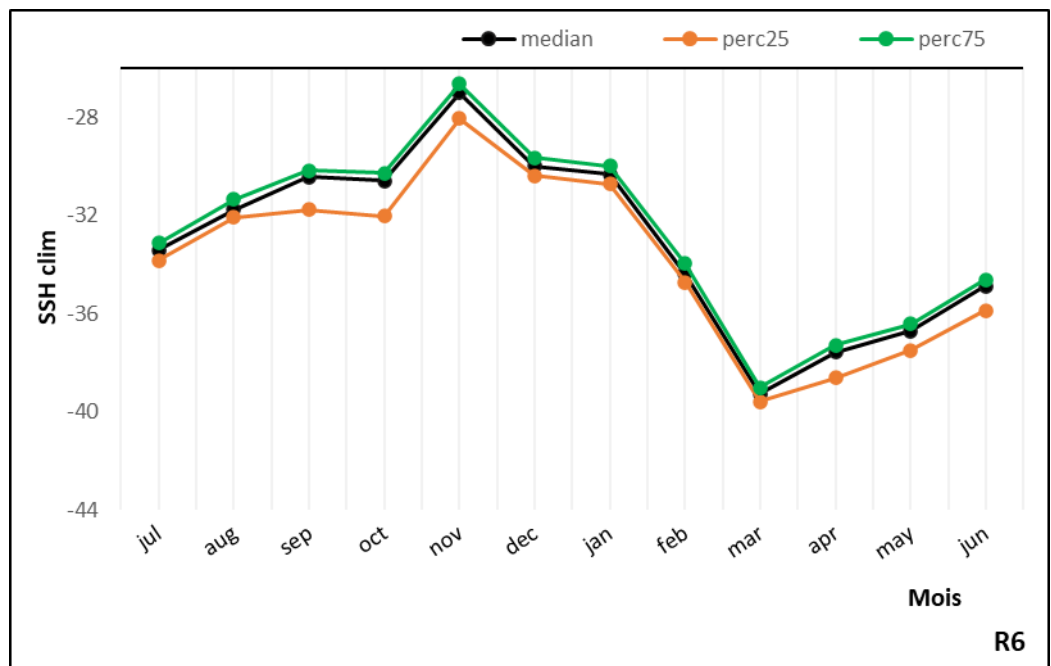
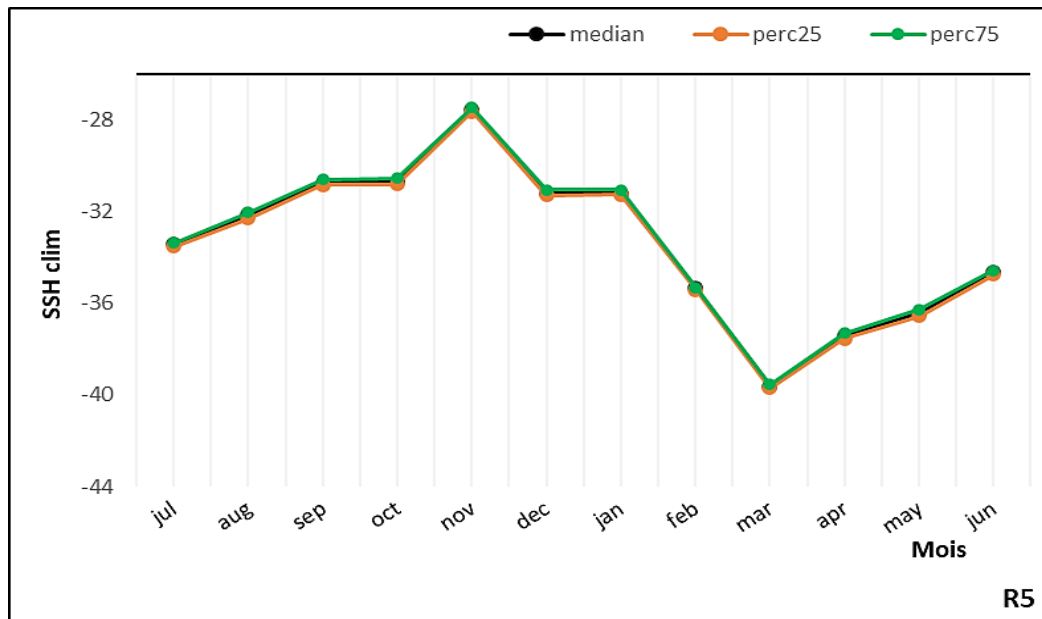


Figure 4-5 : Climatologie de la SSH pour chaque région (1-6) du plateau continental algérien de (1987-2020)

Analyse graphique :

Les graphiques dans la (figure 4-5) représentent les variations climatologiques de la SSH pour la période de 1987 à 2020.

Nous remarquons que les valeurs de la SSH augmentent : dans les régions ouest (R1-R2), la valeur la plus élevée de la SSH se produit en Août alors que la valeur la plus faible se produit en Mars.

Dans les régions (R3-R6), les valeurs de la SSH se produisent en Novembre alors que les plus

faible se produit en Mars.

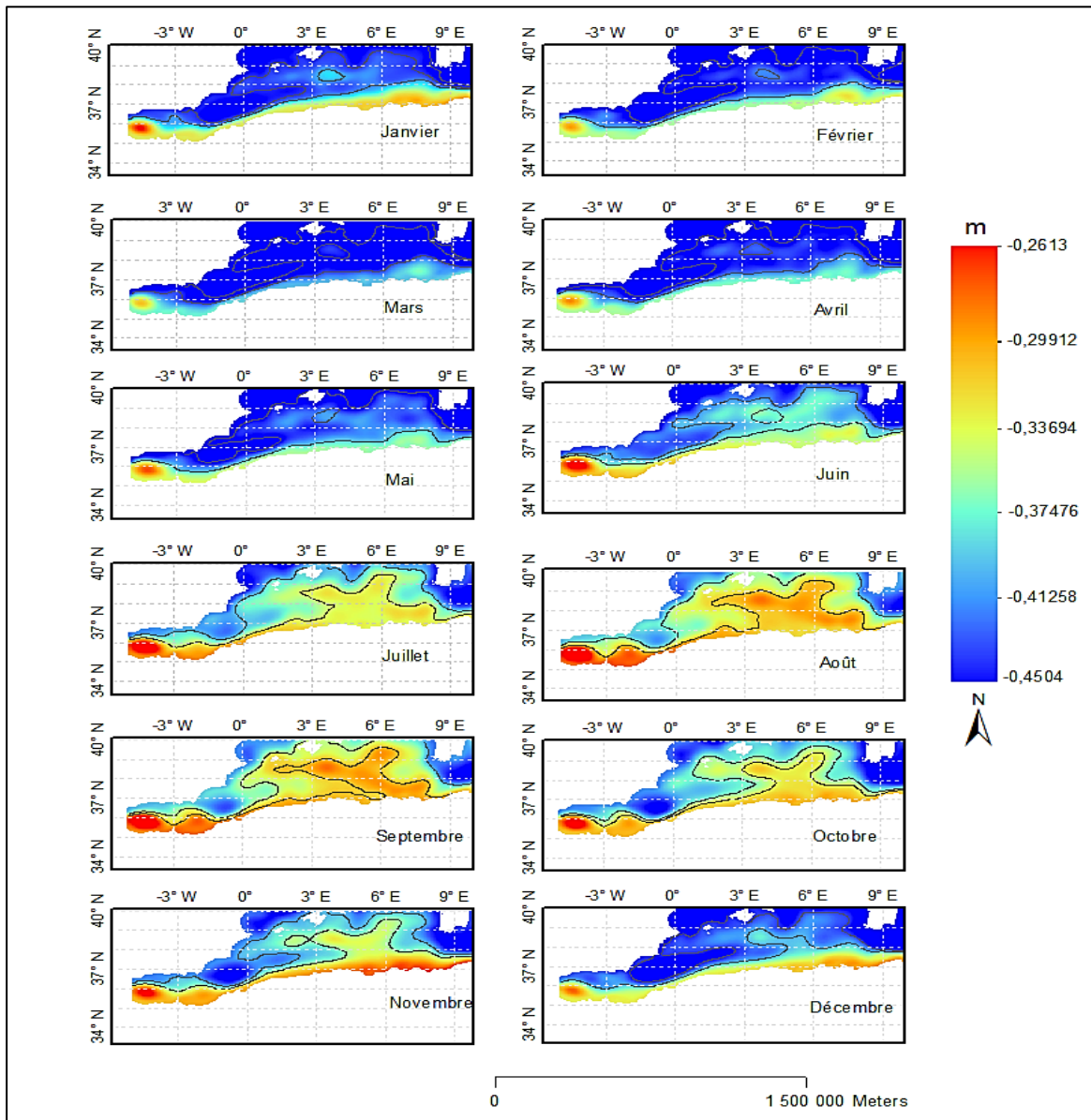
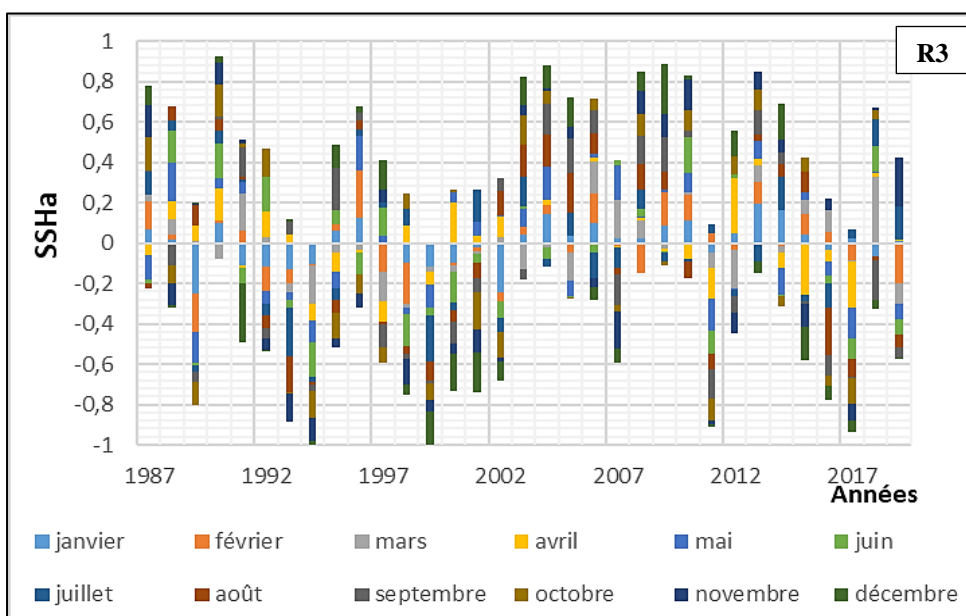
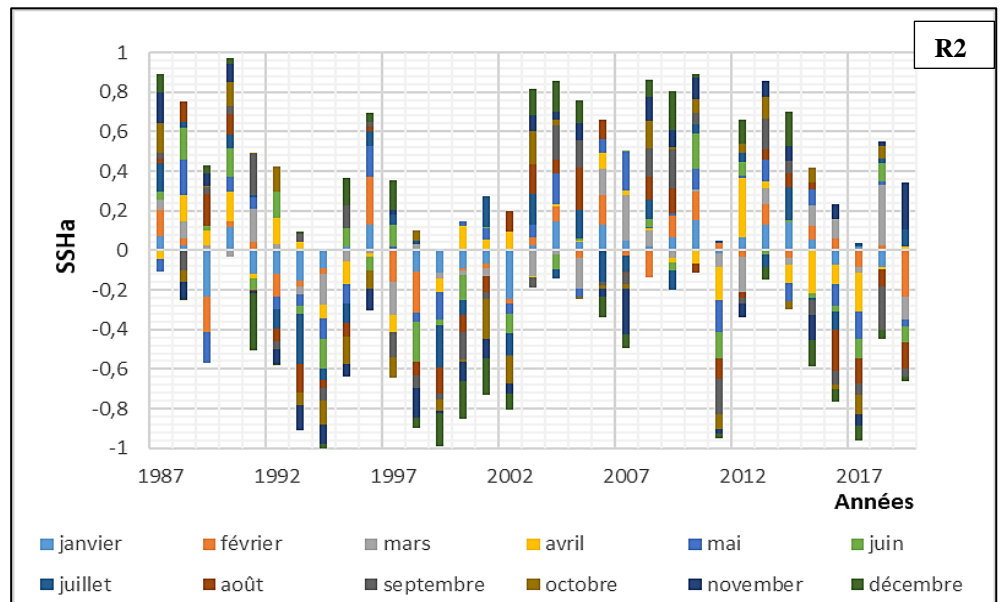
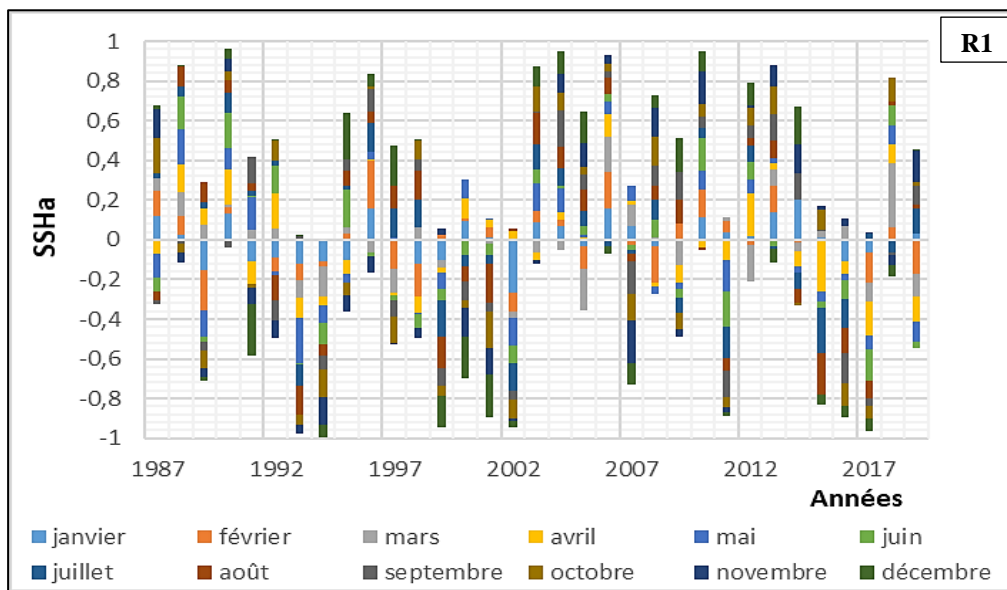
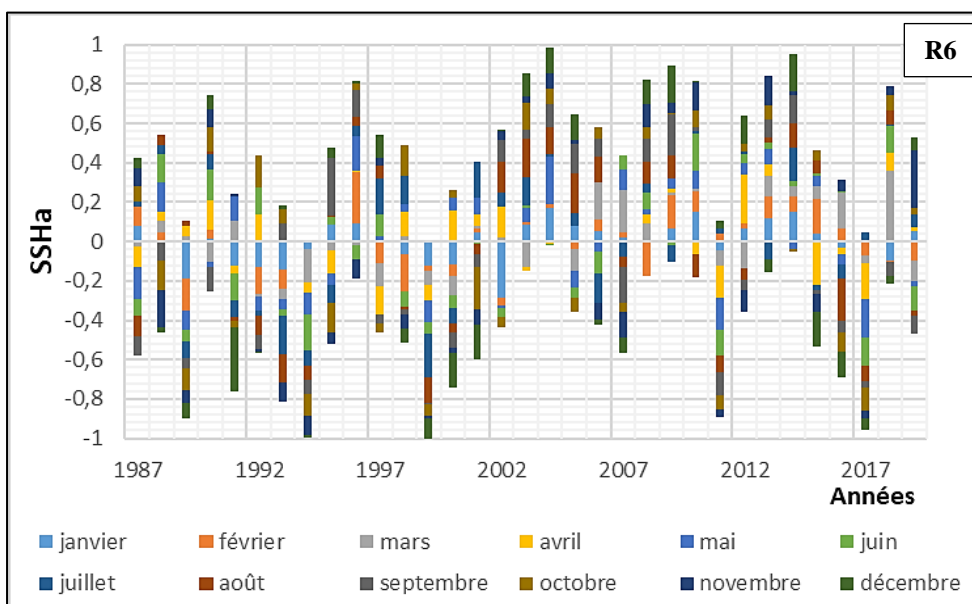
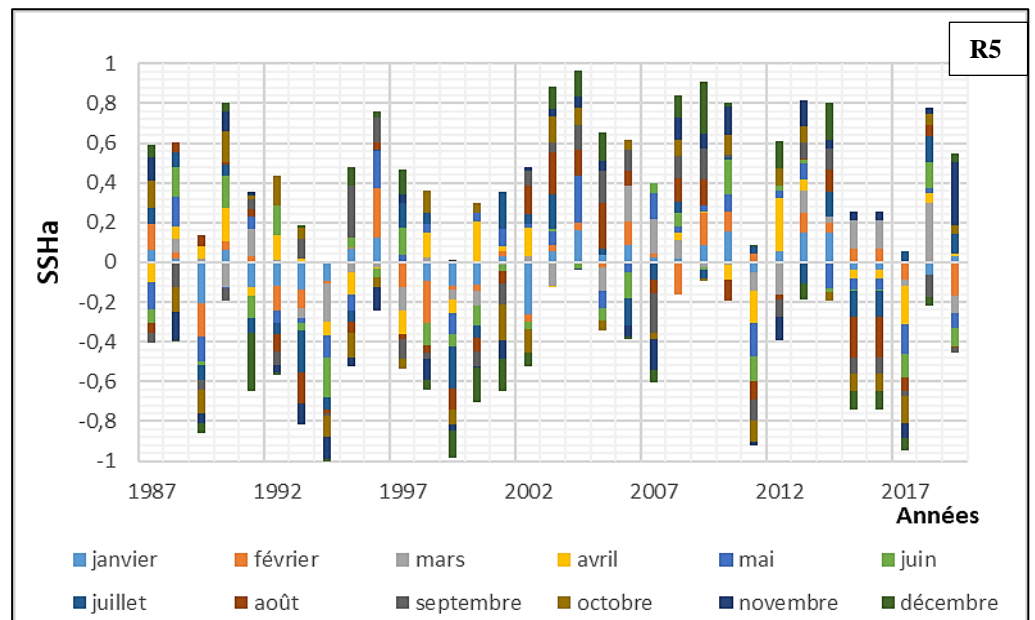
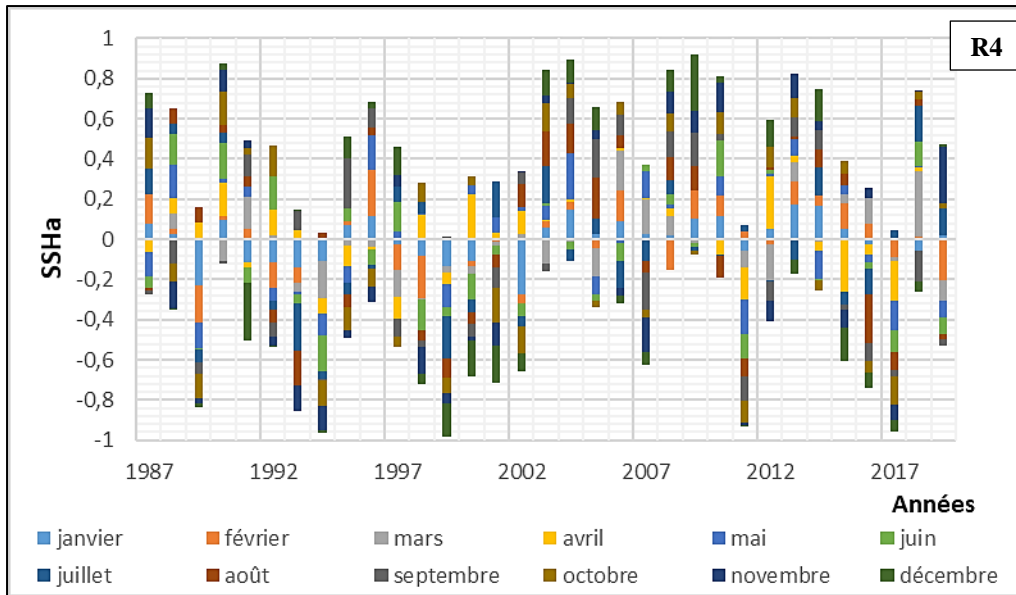


Figure 4-6 : Climatologie des SSHs du plateau continental et du talus algérien de (1987-2020)

La figure (4-6) montre que le début des augmentations des niveaux de la SSH commence au mois de juin, pour atteindre son maximum au mois d'Aout-Septembre ce qui est expliqué par la saison estivale où les températures atteignent leurs maximums. Ceci confirme que la SSH suit le cycle annuel de la SST.

4.6 Anomalies standardisées des SSHs annuelles (1987-2020)





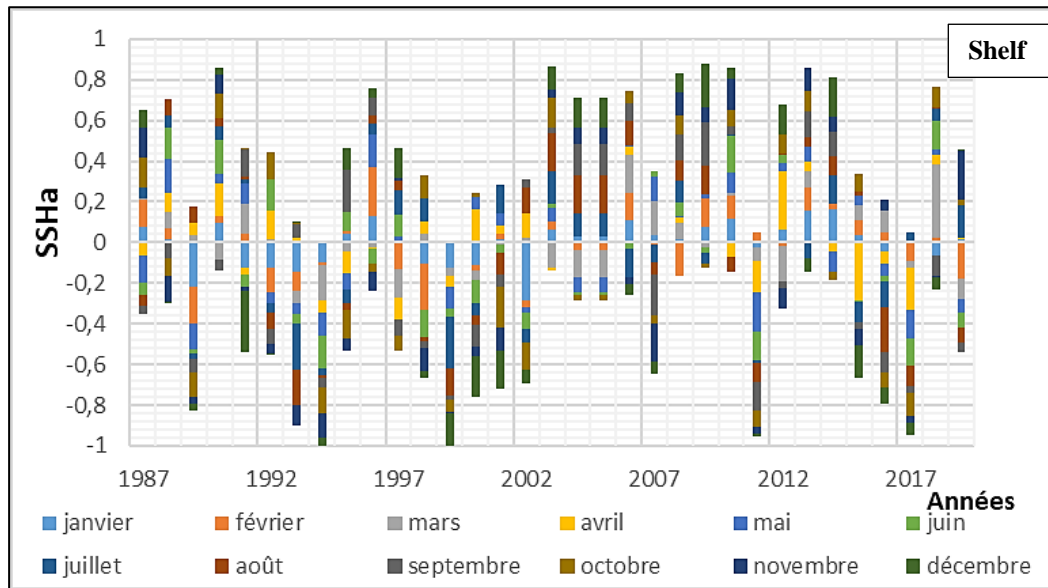


Figure 4-7 : Anomalies standardisées des SSHs annuelles (1987-2020) des six régions (1-6) et le shelf

Les graphiques dans la (**figure 4-7**) représentent les anomalies standardisées des SSH mensuelles pour la période de 1987 à 2020 dans les six régions et le shelf.

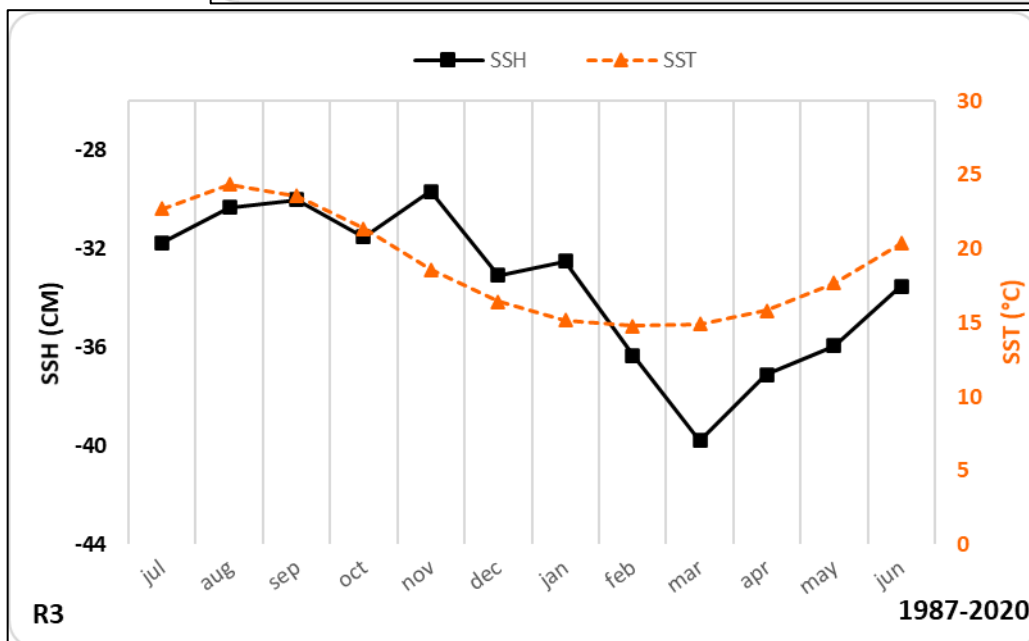
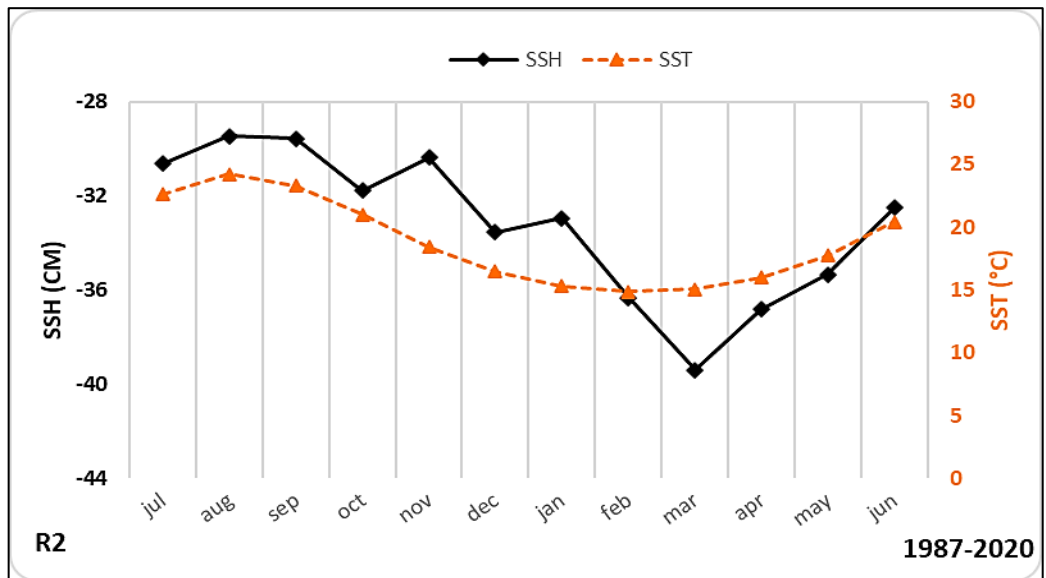
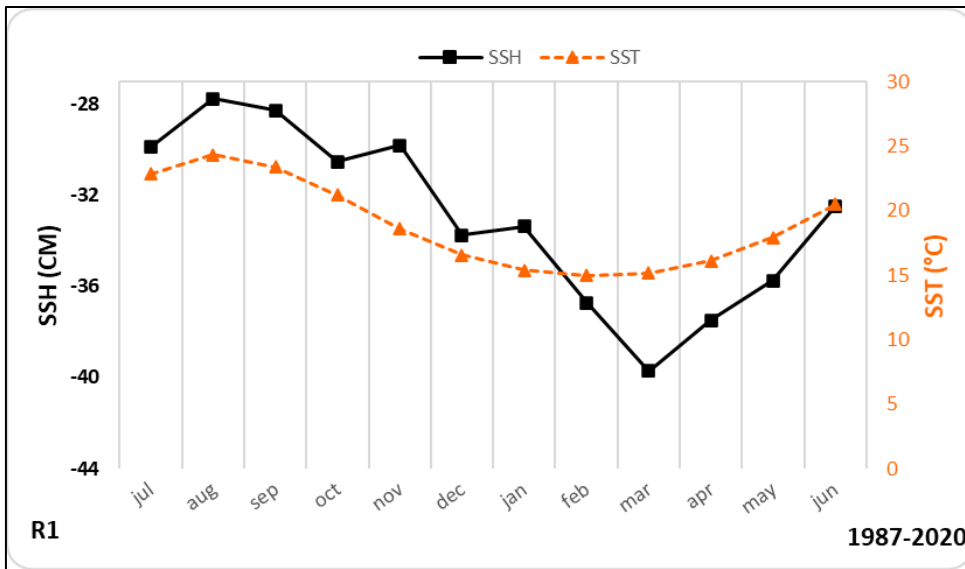
Cette figure nous montre que les mois connaissent presque autant d’anomalies positives que négatives dans toutes les régions.

Ce cycle que tous les résultats nous montrent ressemble au cycle de la NAO (L’oscillation nord-atlantique). Quand un indice NAO est très positif cela signifie qu’il est relié à une circulation zonale (d’ouest en est) plus prononcée, car la différence de pression causant les vents est plus grande. De plus, l’anticyclone plus important sur les Açores fait remonter la circulation vers le nord. Cela signifie qu’en Méditerranée les hivers sont plus secs

Par contre, quand l’indice est négatif, la circulation d’ouest est plus faible ou plus au sud donnant des hivers froids et les dépressions se dirigent alors vers le bassin méditerranéen.

Si l’indice est très négatif, les hivers sont particulièrement froids sur l’Europe du Nord et les précipitations sont déplacées vers la Mer Méditerranée et l’Afrique du Nord.

4.7 Climatologie de la SSH comparé à la SST (1987 à 2020)



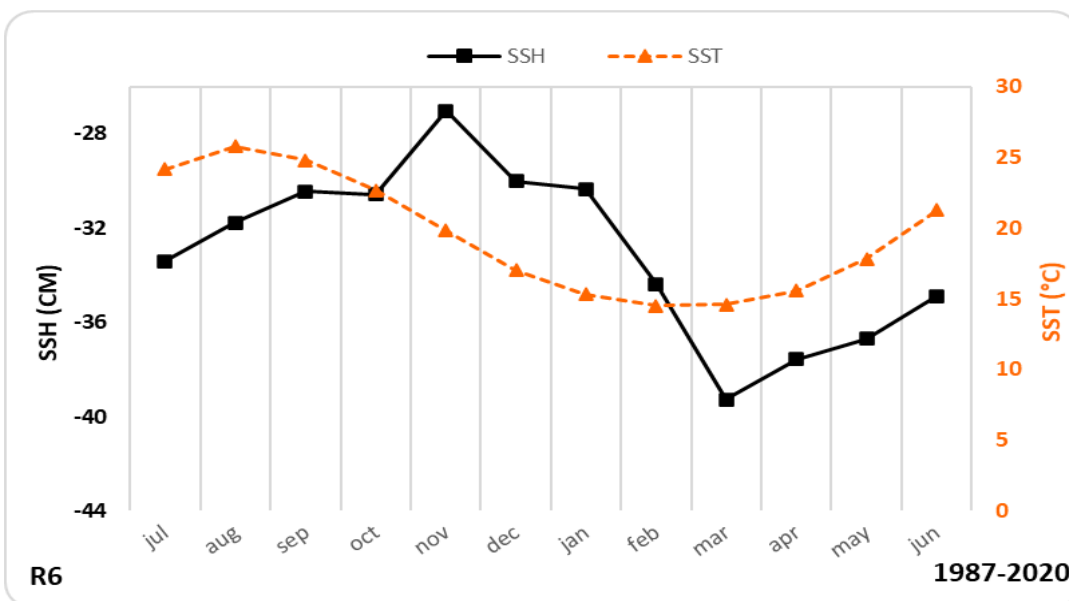
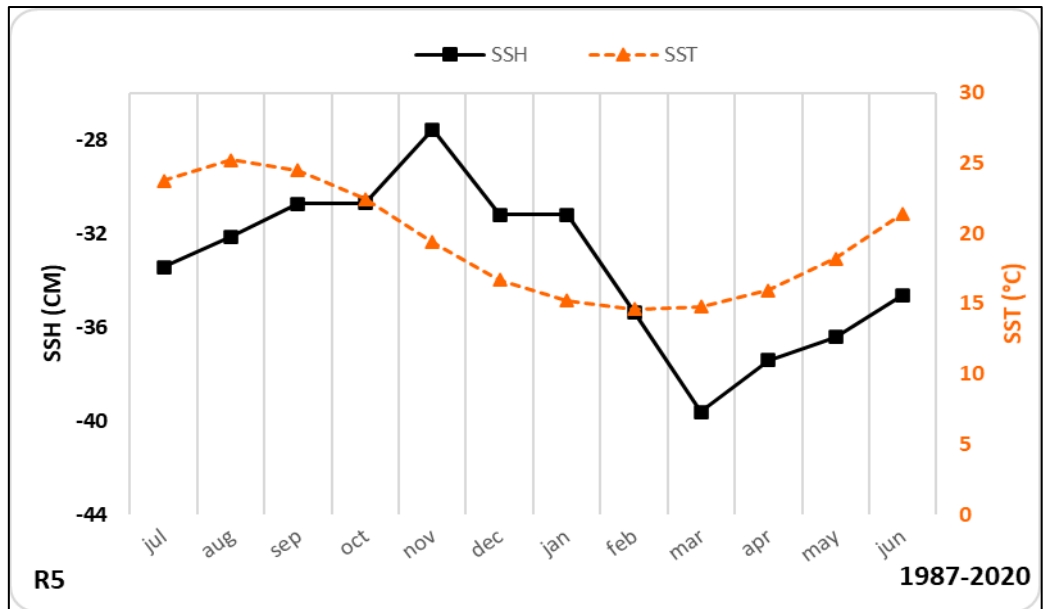
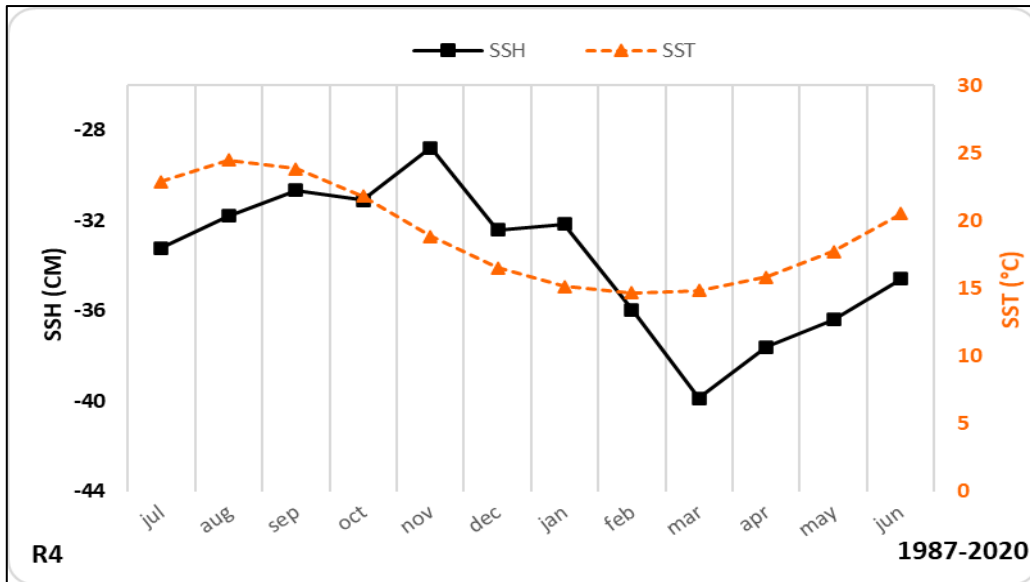


Figure 4-8 : Climatologie de la SSH comparé à la SST (1987 à 2020) dans les régions (1-6)

Analyse des graphes :

Les graphiques représentent les variations du cycle annuel (climatologie) de la SSH comparé à celui de la SST pour la période de 1987 à 2020.

Nous remarquons que la SSH et la SST varient ensemble proportionnellement, ce qui signifie qu'avec l'augmentation des valeurs de la SST, les valeurs de SSH augmentent aussi et vis-versa.

Dans les régions ouest (R1-R2), la valeur la plus élevée de la SSH (de la SST aussi) se produit en Août alors que la valeur la plus faible se produit en mars avec une différence d'environ 12cm. (Voir **tableau 4-3**)

Tableau 4-3 : Pics des valeurs SSHs comparées aux valeurs des SSTs

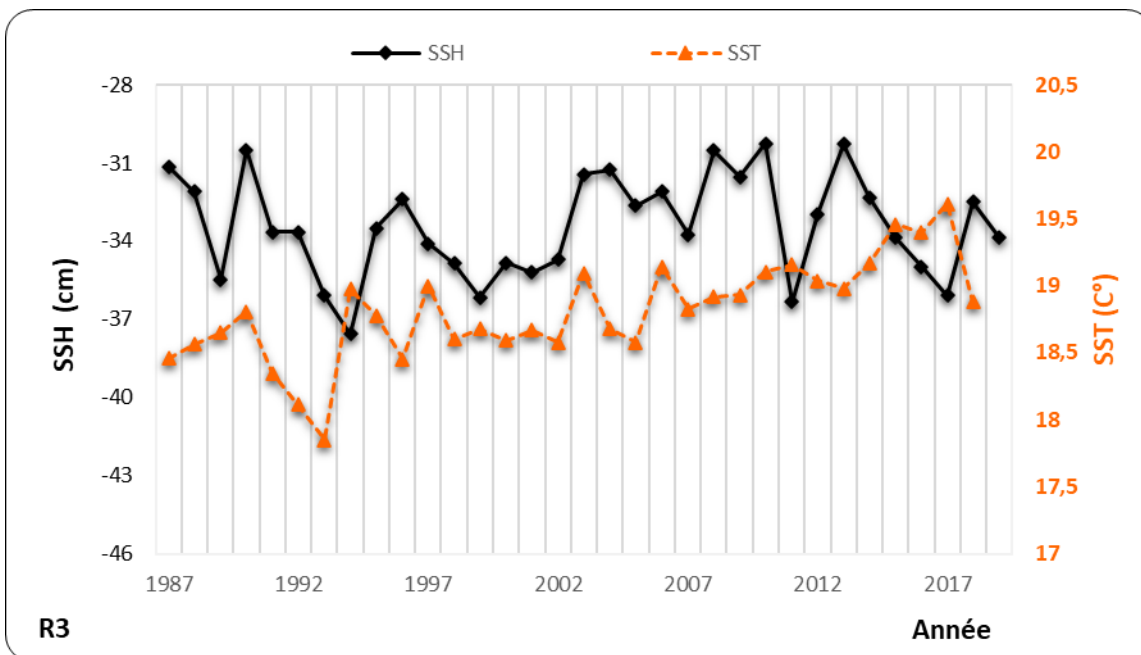
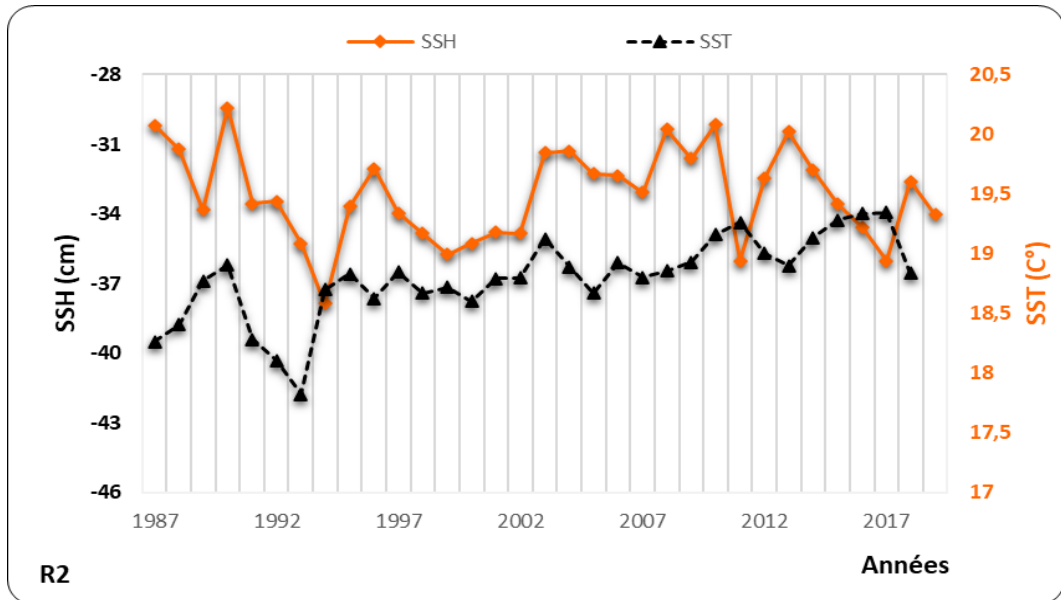
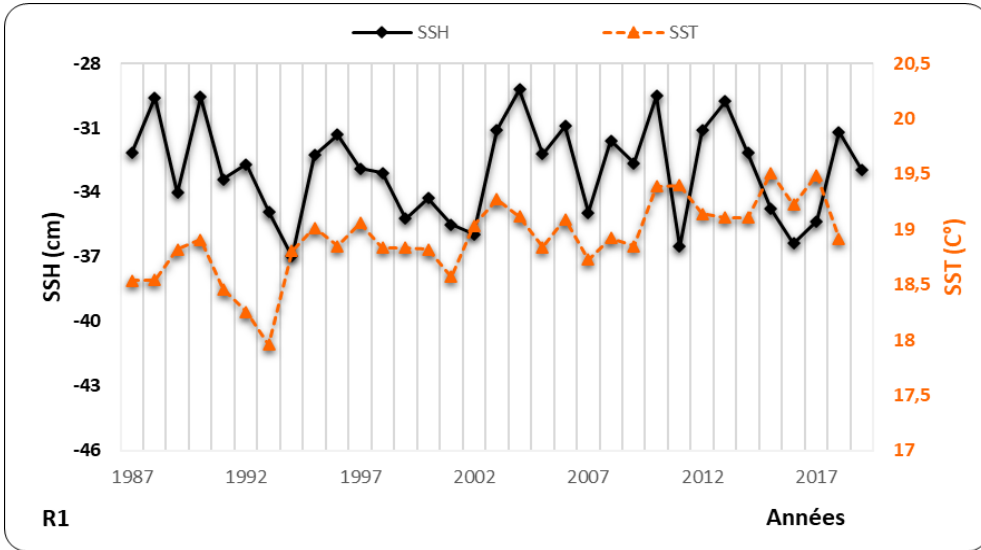
Régions	SSH (cm) MIN	Mois	SSH (cm) MAX	Mois
	SST (°C) MIN	Mois	SST (°C) MAX	Mois
R1	-39,7	Mars	-27,74	Août
	14,96	Mars	24,33 °C	Août
R2	-39,38	Mars	-29,46	Août
	14,87	Mars	24,21°C	Août

Interprétation :

Les valeurs les plus élevées de la SSH et de la SST ont été enregistrées en Août dans les régions 1 et 2, vu que les températures les plus élevées sont enregistrées en Août,

Plusieurs études (par exemple, **(Fukumori et al., 2007)**), ont démontré que la SSH méditerranéenne est influencée de manière significative par le cycle annuel, qui est principalement causé par l'expansion thermique de l'eau de mer.

4.8 Variations interannuelles des SSTs mensuelles et des SSHs mensuelles



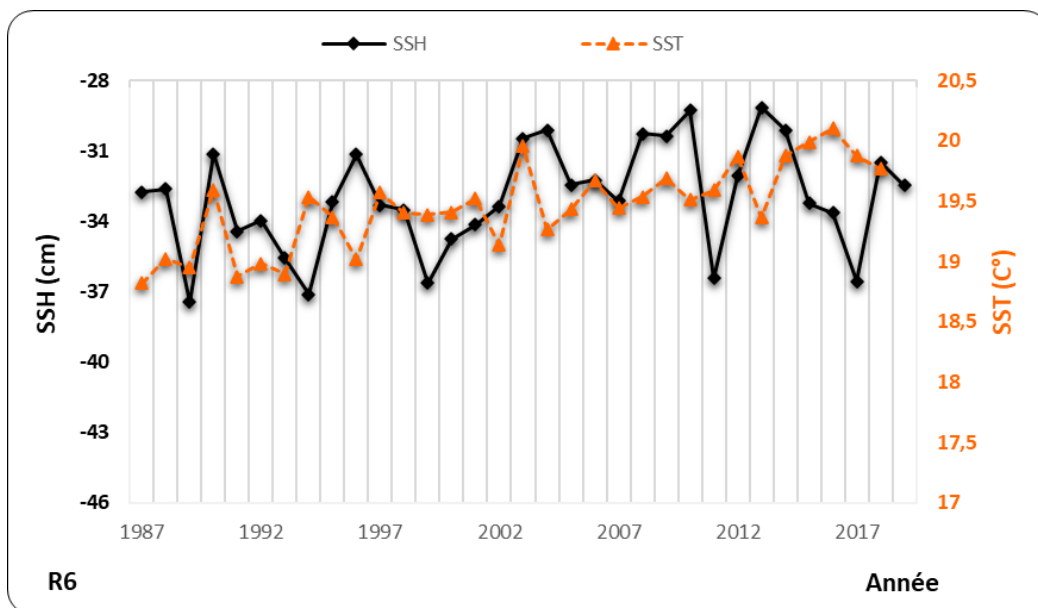
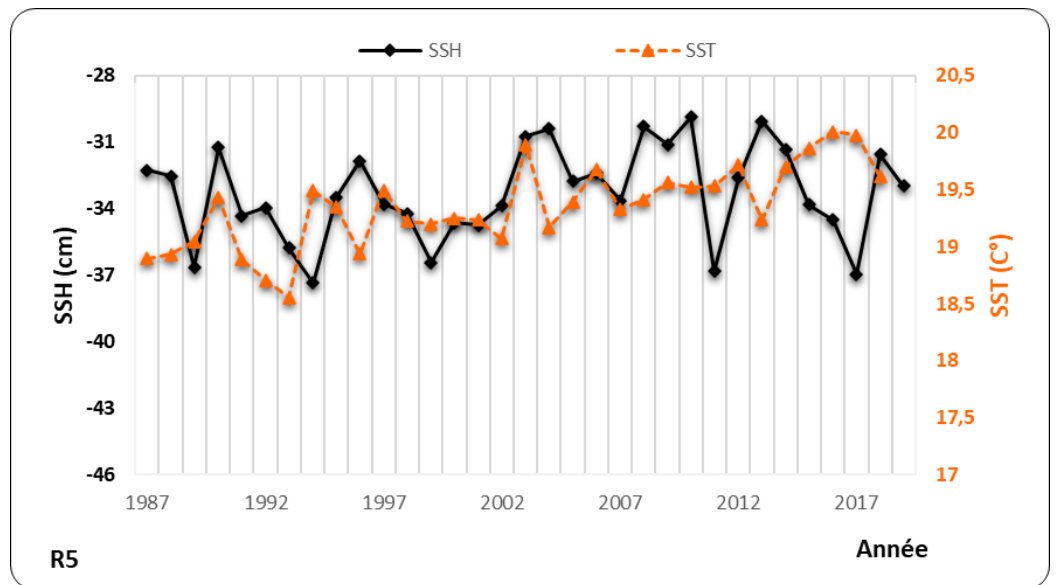
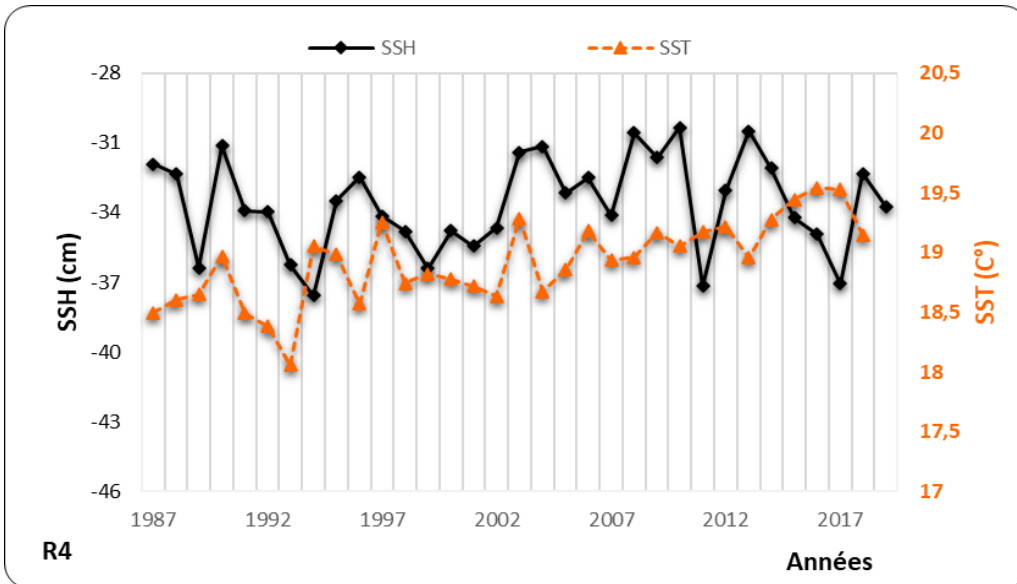


Figure 4-9 : Variations interannuelles (1987-2019) des SSH(s) mensuelles (trait noir) et des SST(s) mensuelles (trait orange) à l'échelle des six régions.

Analyse des graphes :

Les graphiques dans la (**figure 4-9**) représentent les variations interannuelles de la SSH comparées à celle des SST(s).

Nous observant presque les mêmes augmentations dans toutes les régions à partir de l'année 1990 pour les SSH(s) et les SST(s) qui varient ensemble proportionnellement, ce qui signifie qu'avec l'augmentation des valeurs de la SST, les valeurs des SSH(s) augmentent aussi et vis-versa.

4.9 Résultats des tests

4.9.1 Test de normalité

Tableau 4-4 : Résultats du Test de normalité

<i>Column1</i>	
Mean	-33,5729412
Standard Error	0,37233654
Median	-33,65
Mode	-33,65
Standard Deviation	2,17107644
Sample Variance	4,71357291
Kurtosis	-0,29891741
Skewness	-0,37248596
Range	8,69
Minimum	-38,93
Maximum	-30,24
Sum	-1141,48
Count	34
Largest(1)	-30,24
Smallest(1)	-38,93
Confidence Level(95,0%)	0,75752438

- A partir de l'asymétrie :

Dans notre cas, "Données SSH annuelle 1987-2020, Région 1", l'asymétrie est = -0.37248596.

Les données présentent donc une asymétrie à gauche (négative) avec :

Moyenne < Médiane < Mode, Cela signifie que nos données ne suivent pas une loi normale (voir **tableau 4-4**).

- A partir de l'aplatissement :

Dans notre cas, " Données SSH annuelle 1987-2020, Région 1 ", l'aplatissement est égal à - 0.29891741, l'aplatissement est inférieur à 3 (Platykurtique) et diffère de zéro. Par conséquent, les données ne suivent pas une loi normale.

- **A partir de la boîte à moustache :**

La boîte montre que les données suivent une loi normale, si la moyenne est nulle (la ligne séparant la boîte est à zéro voir **(figure 4-11)**), contrairement au cas de nos données (données SSH annuelle 1987/2020, Région1) où la moyenne est égale à -33,57294118 selon la boîte à moustache obtenue à partir d'Excel **(figure 4-10)**. Cela confirme que nos données ne suivent pas une loi normale.

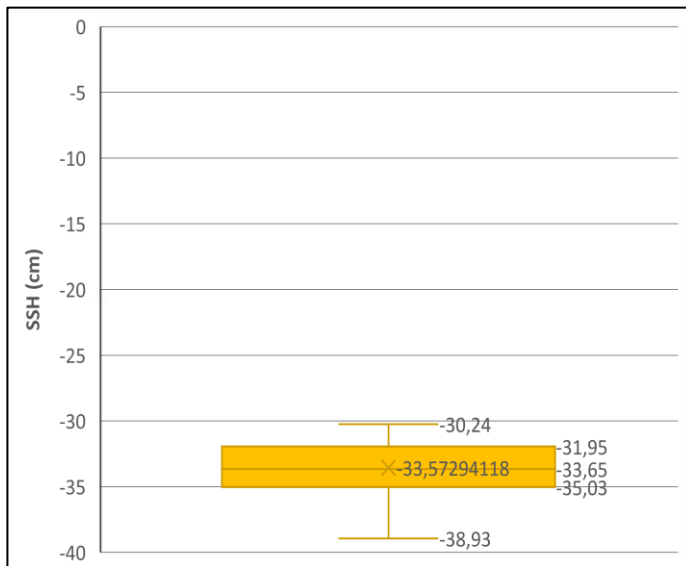


Figure 4-10 : Boîte à moustache de la Région 1

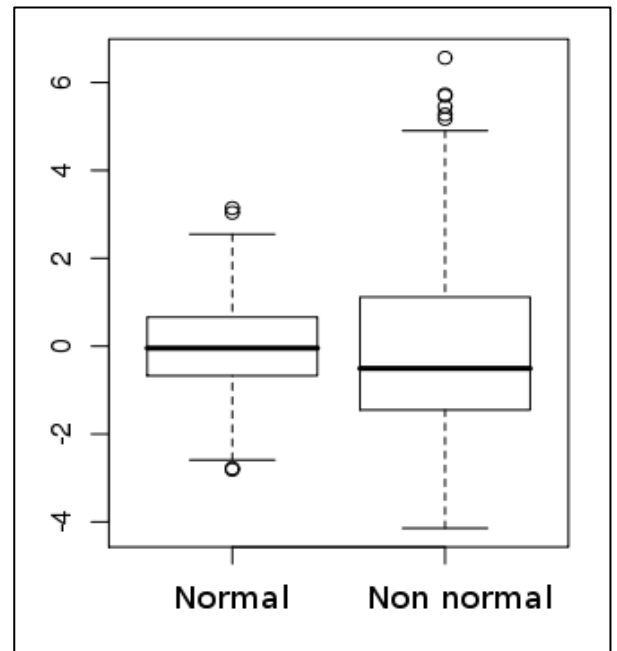


Figure 4-11 : La boîte à moustache dans l'état normal et non normal

C'était une explication du test de normalité des données annuelles SSH (1987/2020) Région1. Ce test a été appliqué à toutes nos données : saisonnières, climatologie, mensuelle et les variabilités interannuelles. Nous aboutissons toujours au même résultat, qui est : nos données ne suivent pas une loi normale car l'asymétrie et l'aplatissement sont négatifs (voir **tableau 4-5**).

Tableau 4-5 : Résultats du test de normalité appliqué sur l'ensemble de données de la SSH (1987-2020) le long des six régions.

	Région1	Région2	Région3	Région4	Région5	Région6	Shelf
Variabilité interannuelle de la SSH 1987/2020	Ne suivent pas une loi normale	Ne suivent pas une loi normale	Ne suivent pas une loi normale	Ne suivent pas une loi normale	Ne suivent pas une loi normale	Ne suivent pas une loi normale	Ne suivent pas une loi normale
SSH annuelle 1987/2020	Ne suivent pas une loi normale	Ne suivent pas une loi normale	Ne suivent pas une loi normale	Ne suivent pas une loi normale	Ne suivent pas une loi normale	Ne suivent pas une loi normale	Ne suivent pas une loi normale
SSH saisonnière	Ne suivent pas une loi normale	Ne suivent pas une loi normale	Ne suivent pas une loi normale	Ne suivent pas une loi normale	Ne suivent pas une loi normale	Ne suivent pas une loi normale	Ne suivent pas une loi normale
Climatologie	Ne suivent pas une loi normale	Ne suivent pas une loi normale	Ne suivent pas une loi normale	Ne suivent pas une loi normale	Ne suivent pas une loi normale	Ne suivent pas une loi normale	Ne suivent pas une loi normale
variabilités interannuelles du SST 1987/2020	Ne suivent pas une loi normale	Ne suivent pas une loi normale	Ne suivent pas une loi normale	Ne suivent pas une loi normale	Ne suivent pas une loi normale	Ne suivent pas une loi normale	Ne suivent pas une loi normale

4.9.2 Tests d'autocorrélation (test de J.Durbin et G.Watson)

Nous avons appliqué ce test à nos données, et nous obtenons le résultat montré dans la **figure 4-12**, (données SSH annuelles 1987/2020, Région1)

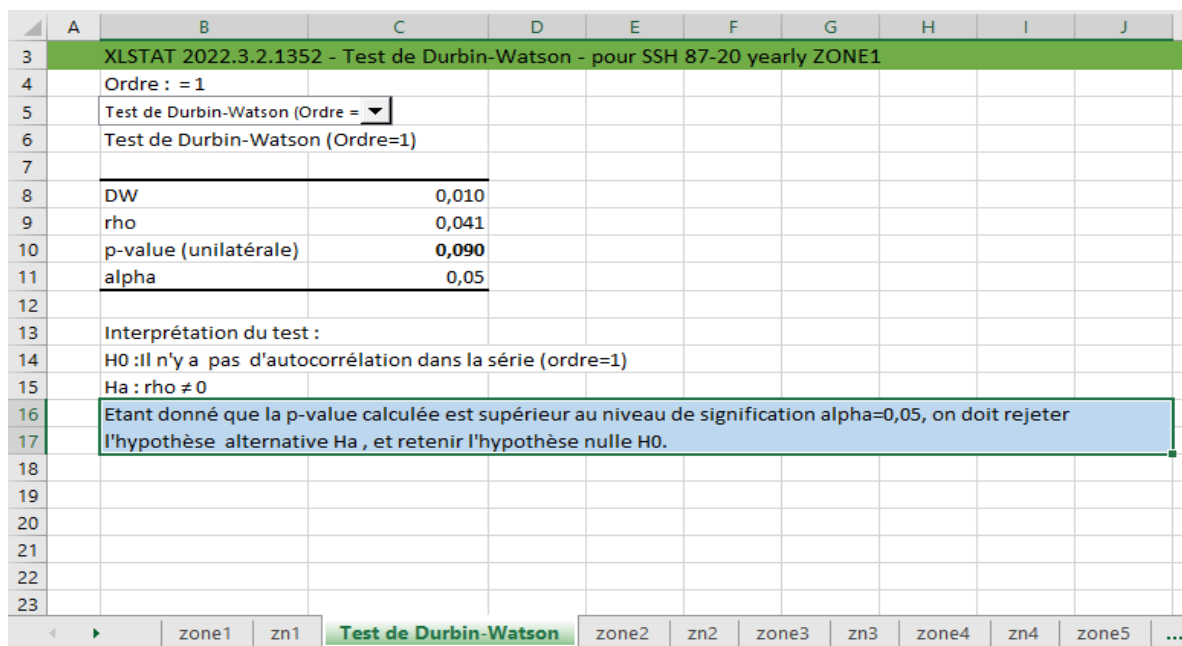


Figure 4-12 : Résultat du test de Durbin-Watson pour, variabilités annuelles de la SSH 1987/2020 Région 1

Tableau 4-6 : Résultats du test de Durbin-Watson appliqué sur l'ensembles de données de la SSH (1987-2020) le long des six région (R1-R6)

	Région1	Région2	Région3	Région4	Région5	Région6	Shelf
Variabilité interannuelle de la SSH 1987/2020	Il n'y a pas d'autocorrélation	Il n'y a pas d'autocorrélation	Il n'y a pas d'autocorrélation	Il n'y a pas d'autocorrélation	Il n'y a pas d'autocorrélation	Il n'y a pas d'autocorrélation	Il n'y a pas d'autocorrélation
SSH annuelle 1987/2020	Il n'y a pas d'autocorrélation	Il n'y a pas d'autocorrélation	Il n'y a pas d'autocorrélation	Il n'y a pas d'autocorrélation	Il n'y a pas d'autocorrélation	Il n'y a pas d'autocorrélation	Il n'y a pas d'autocorrélation
SSH saisonnière	Il n'y a pas d'autocorrélation	Il n'y a pas d'autocorrélation	Il n'y a pas d'autocorrélation	Il n'y a pas d'autocorrélation	Il n'y a pas d'autocorrélation	Il n'y a pas d'autocorrélation	Il n'y a pas d'autocorrélation
Climatologie	Il n'y a pas d'autocorrélation	Il n'y a pas d'autocorrélation	Il n'y a pas d'autocorrélation	Il n'y a pas d'autocorrélation	Il n'y a pas d'autocorrélation	Il n'y a pas d'autocorrélation	Il n'y a pas d'autocorrélation
variabilités interannuelles du SST 1987/2020	Il n'y a pas d'autocorrélation	Il n'y a pas d'autocorrélation	Il n'y a pas d'autocorrélation	Il n'y a pas d'autocorrélation	Il n'y a pas d'autocorrélation	Il n'y a pas d'autocorrélation	Il n'y a pas d'autocorrélation
SSH mensuelle 16/01/1987-16/12/2019	Il n'y a pas d'autocorrélation	Il n'y a pas d'autocorrélation	Il n'y a pas d'autocorrélation	Il n'y a pas d'autocorrélation	Il n'y a pas d'autocorrélation	Il n'y a pas d'autocorrélation	Il n'y a pas d'autocorrélation

4.9.3 Test de Mann –Kendall

Le test de Mann-Kendall que nous avons appliqué à la série de données annuelles SSH 1987/2020, afin de voir s'il y a une tendance ou pas. Son résultat dans la **figure (4-13)**, où l'hypothèse a (il existe une tendance dans la série) a été confirmée par rapport à l'hypothèse 0 (il n'y a pas de tendance dans la série).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
3	XLSTAT- Tests de tendance de Mann-Kendall pour ,ssh 87_20 yearly ZONE1.xlsx									
4										
5	Test de tendance de Mann-Kendall / Test bilatéral (-32,17) :									
6										
7		Tau de Kendall	-0,080							
8		S	-42							
9		Var(S)	4165,333							
10		p-value (bilatérale)	<0,0001							
11		alpha	0,05							
12	Une approximation a été utilisée pour calculer la p-value.									
13	Interprétation du test :									
14	H0 : Il n'y a pas de tendance dans la série									
15	Ha : Il existe une tendance dans la série									
16										
17	Etant donné que la p-value calculée est inférieure au niveau de signification seuil alpha=0,05, on doit									
18	rejeter l'hypothèse nulle H0, et retenir l'hypothèse alternative Ha									
19										
20										

Figure 4-13 : Résultat de test de Mann-Kendall, SSH annuelle (1987-2020) Région1

Tableau 4-7 : Résultats du test de Mann- Kendall appliqué sur l'ensembles de données de la SSH (1987-2020) le long des six région (R1-R6)

	Région1	Région2	Région3	Région4	Région5	Région6	Shelf
Variabilité interannuelle de la SSH 1987/2020	Il existe une tendance	Il existe une tendance	Il existe une tendance	Il existe une tendance	Il existe une tendance	Il existe une tendance	Il existe une tendance
SSH annuelle 1987/2020	Il existe une tendance	Il existe une tendance	Il existe une tendance	Il existe une tendance	Il existe une tendance	Il existe une tendance	Il existe une tendance
SSH saisonnière	Il existe une tendance	Il existe une tendance	Il existe une tendance	Il existe une tendance	Il existe une tendance	Il existe une tendance	Il existe une tendance
Climatologie	Il existe une tendance	Il existe une tendance	Il existe une tendance	Il existe une tendance	Il existe une tendance	Il existe une tendance	Il existe une tendance
variabilités interannuelles du SST 1987/2020	Il existe une tendance	Il existe une tendance	Il existe une tendance	Il existe une tendance	Il existe une tendance	Il existe une tendance	Il existe une tendance
SSH mensuelle 16/01/1987-16/12/2019	Il existe une tendance	Il existe une tendance	Il existe une tendance	Il existe une tendance	Il existe une tendance	Il existe une tendance	Il existe une tendance

4.9.4 Test de corrélation (Spearman)

Nous avons appliqué le test à nos données spécifiquement Climatologie et Variabilités interannuelle, parce que ce sont les deux fichiers qui contiennent SSH et SST ensemble, et nous avons trouvé le résultat suivant :

Climatologie en région (1) voir **figure (4-14)**

- Le coefficient de corrélation $-1 < \text{Rho} = 0,776 < 1$, une valeur positive (corrélation positive). Comme notre rho est très proche de 1, cela signifie qu'il existe une forte corrélation positive entre la SST et la SSH (la SST et la SSH varient ensemble dans le même sens).
- A travers le nuage de points, on voit que les points forment une ligne droite, ce qui indique une relation linéaire positive, lorsque les valeurs de SSH augmentent, les valeurs de SST augmentent.

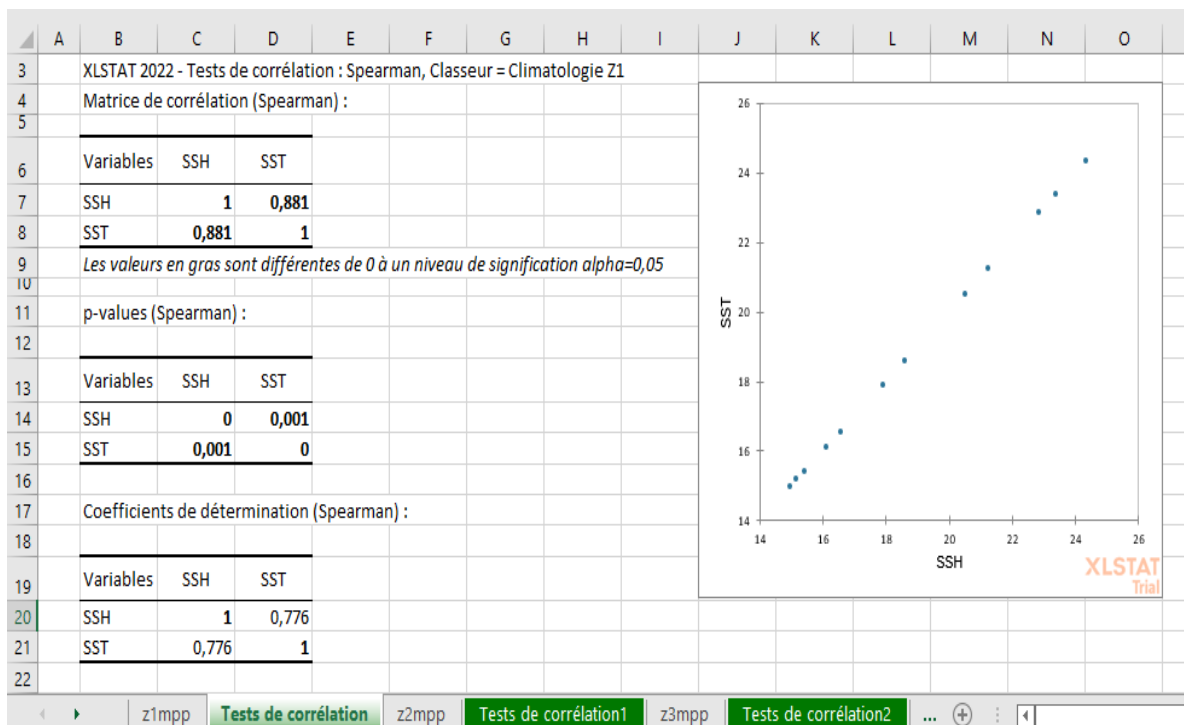
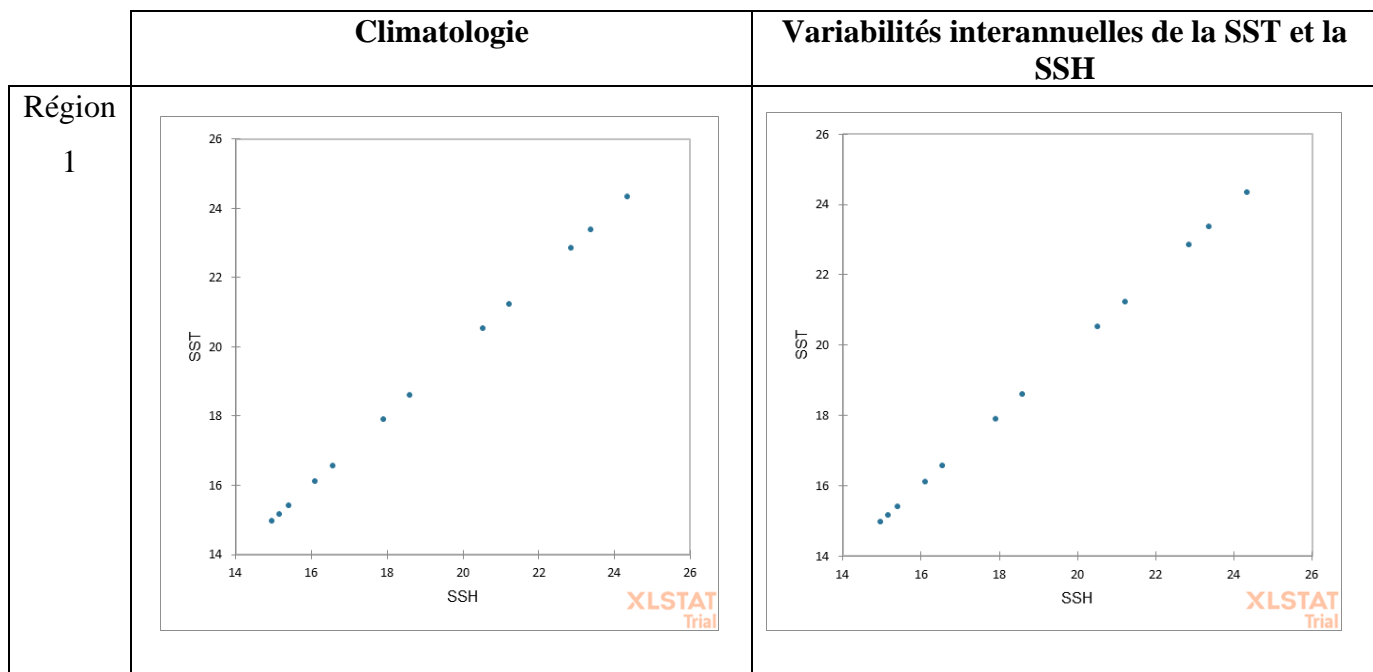


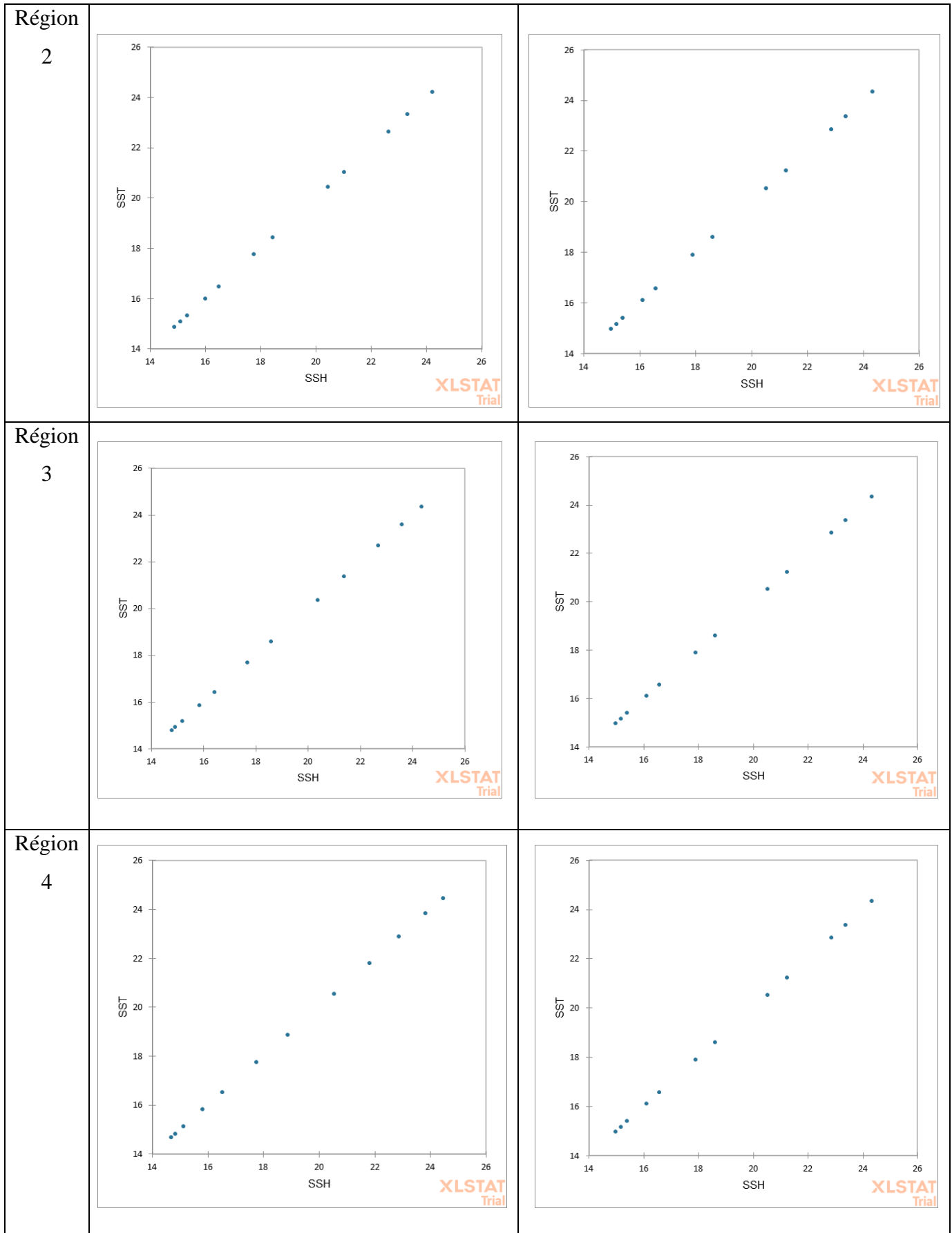
Figure 4-14 : Résultat de test de corrélation « Spearman », pour climatologie (R1)

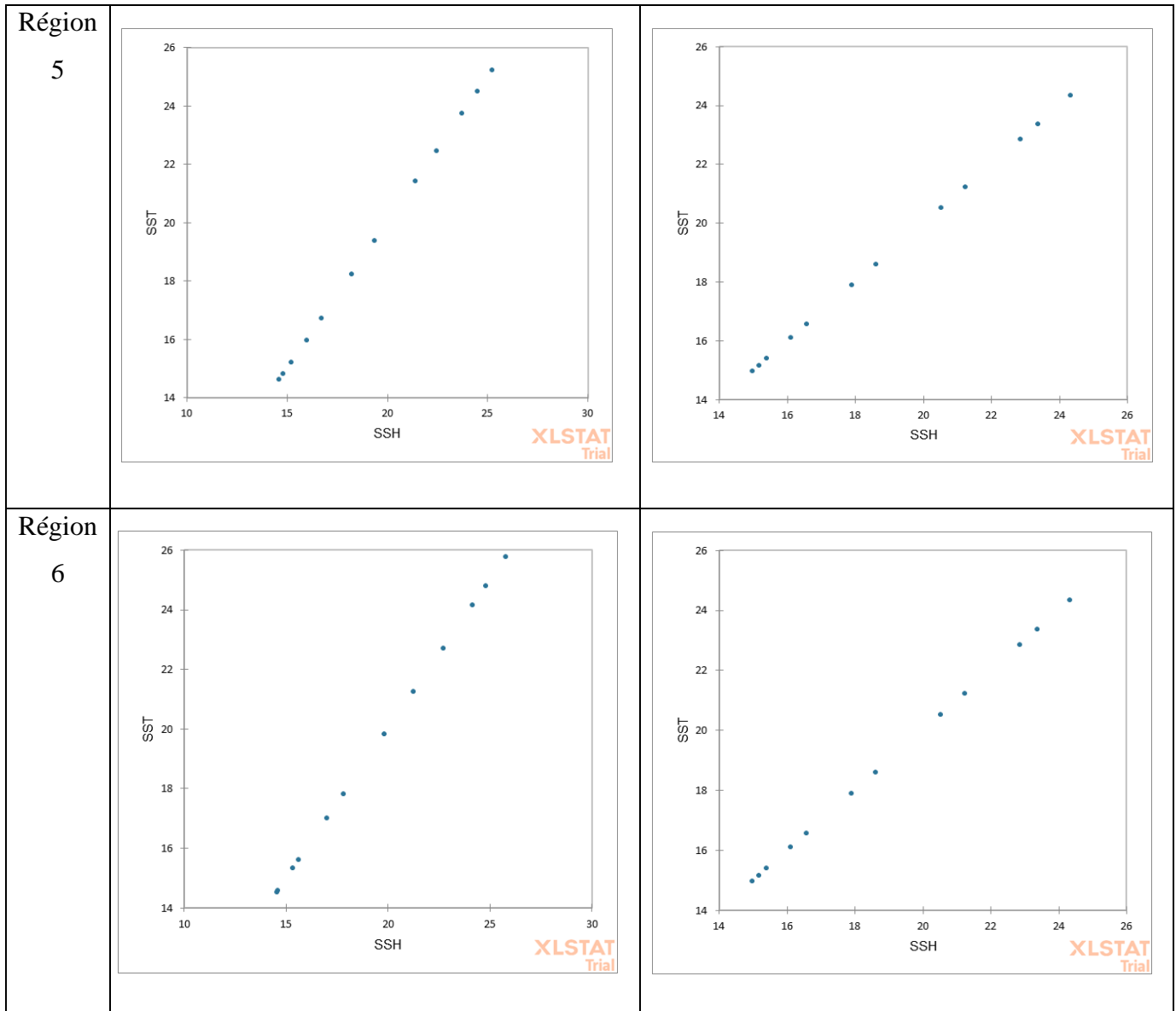
Tableau 4-8 : Résultats du test de corrélation « Spearman », Rho appliqué sur l'ensembles de données climatologiques de la SSH et les variabilités interannuelle de la SST et de la SSH (1987-2020) le long des six région (R1-R6)

	Région 1	Région 2	Région 3	Région 4	Région 5	Région 6
Climatologie	Forte corrélation positive Rho =0,776	Forte corrélation positive Rho =0,770	Forte corrélation positive Rho =0, 701	Forte corrélation positive Rho =0,698	Forte corrélation positive Rho =0,669	Fort corrélation positive Rho=0,700
Variabilités interannuelles de la SST et SSH	Forte corrélation positive Rho =0,796	Forte corrélation positive Rho =0,762	Forte corrélation positive Rho =0,777	Forte corrélation positive Rho =0,729	Forte corrélation positive Rho =0,676	Forte corrélation positive Rho =0,697

Tableau 4-9 : Résultats du test de corrélation « Spearman », nuage de points appliqué sur l'ensembles de données climatologiques de la SSH et les variabilités interannuelle de la SST et de la SSH (1987-2020) le long des six région (R1-R6)







Conclusion générale

Conclusion générale :

Au cours de ce mémoire nous avons tenté d'approfondir nos connaissances sur le réchauffement des eaux marines et ses conséquences, plus précisément l'élévation de niveau de la mer. Nous nous sommes concentrées sur les côtes Algériennes qui sont particulièrement vulnérable à la variation et changement du climat.

Cette étude nous a conduit à certaines réponses posées précédemment concernant l'évaluation multi temporelle et multi spatiale de la dynamique de la hauteur de la surface de la mer le long du plateau continental et du talus algérien.

Nous avons tenté aussi de comprendre le lien existant entre les hauteurs de la surface de la mer (SSH) et les températures de la surface de la mer (SST). Ce qui nous a permis de tirer les conclusions suivantes :

A l'échelle mensuelles les SSH présentent des augmentations dans les régions (2-6) allant de mois de mars 1994 jusqu'au mois de novembre 2019 contrairement à la région (1) qui enregistre quelques diminution.

A l'échelle interannuelle les SSH augmentant à partir des années 90 suivant les mêmes augmentations des SST.

La climatologie des SSH a révélé que les valeurs plus élevées ont été enregistrées en mois d'Août et Septembre qui est expliquée par la saison estivale et les valeurs les plus faibles étaient en mois de Mars dans toutes les régions.

Grâce au test de Spearman nous avons trouvé que la SST et la SSH sont corrélées positivement.

Ceci nous a permis de confirmer certains patterns établis à l'échelle de la méditerranée comme le fait que la variabilité de la SSH suit le cycle annuel de la SST.

Nous avons rencontré de sérieuses difficultés à manipuler et à interpréter des données négatives. Aussi, nous étions un peu confuses quant aux multiples définitions des champs altimétriques.

Si bien qu'à la fin de ce travail nous nous posons encore des questions et n'avons pas encore l'impression d'avoir tout cerner ni d'avoir valorisé tous les résultats obtenus.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

Algérie, M., Hallouz, F., Meddi, M., Mahe, G., Karahacane, H., & Rahmani, E. A. (2022). *Tendance des précipitations et évolution des écoulements dans Trend in precipitation and evolution of discharge in a climate change context: Wadi Mina watershed in Algeria écoulements dans un cadre de changement climatique: bassin versant de l'oued mina en algérie.*

AquaPortail. (2009). [En ligne]. [Consulté le 18 septembre 2022]. <https://www.aquaportail.com/definition-5482-teledetection.html>

Bahbah, L., Bensari, B., Chabane, K., Torras, X., Ballesteros, E., Seridi, H. (2020). Cartography of littoral rocky-shore communities to assess the ecological status of water bodies through the application of CARLIT method in Algeria (South-Western Mediterranean Sea). *Marine Pollution Bulletin*, 157, p.p. 111 - 356.

Benzouai, S., Louanchi, F., Smara, Y. (2018). Phytoplankton initiation bloom magnitude in Algerian continental shelf waters using 11 years of ocean color observations. In C. R. Bostater, S. P. Mertikas, & X. Neyt (Éds.), *Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions 2018* (p. 36).

Benzouai, S., Louanchi, F., Smara, Y. (2020a). Phytoplankton phenology in algerian continental shelf and slope waters using remotely sensed data. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, p. 247.

Benzouai, S., Louanchi, F., & Smara, Y. (2020b). Phytoplankton phenology in algerian continental shelf and slope waters using remotely sensed data. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, p. 247.

Benzouai, S., Smara, M. Y., Aissa, M. A. B., Louanchi, M. F., Boulahdid, M. M., Diaf, M. M., & Hirche, M. A. (2022). Détermination de la dynamique du phytoplancton par imagerie satellitaire : Cas des eaux Algériennes. Thèse de doctorat. Alger : Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediène, p. 213.

Bermejo, R., Ramírez-Romero, E., Vergara, J. J., & Hernández, I. (2015). Spatial patterns of macrophyte composition and landscape along the rocky shores of the Mediterranean–Atlantic transition region (northern Alboran Sea). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 155, p.p. 17-28.

- Boudrissa, N., Cheraitia, H., & Halimi, L. (2017).** Modelling maximum daily yearly rainfall in northern Algeria using generalized extreme value distributions from 1936 to 2009. *Meteorological Applications*, 24(1), p.p. 114-119.
- Declerck, A. (2017).** *Approche numérique et expérimentale pour une meilleure description physique des processus de submésos-échelle : Application à la mer Méditerranée*
- Douguédroit, A. (2018).** *Modelisation du rechauffement des alpes du sud.* p.p. 176-181.
- Drouiche, A., Nezzal, F., & Djema, M. (2019).** Variabilité interannuelle des précipitations dans la plaine de la Mitidja en Algérie du Nord. *Revue des sciences de l'eau*, 32(2), p.p. 165-177.
- Environnement, L., Provence, R., Corse, A. (2014).** *Bases scientifiques et techniques d'un observatoire du changement global en mer.* 1985.
- Fukumori, I., Menemlis, D., Lee, T. (2007).** A near-uniform basin-wide sea level fluctuation of the mediterranean sea. *Journal of Physical Oceanography*, 37(2), p.p. 338-358.
- Ghodbani, T., et Bougherira, A. (2019).** Le littoral algérien entre protection de l'environnement et impératifs du développement, Enjeux et Perspectives. *Geo-Eco-Trop*, 43(4), p.p. 559-568.
- Grimes, S., Ruellet, T., Dauvin, J.-C., Boutiba, Z. (2010).** Ecological quality status of the soft-bottom communities on the Algerian coast: General patterns and diagnosis. *Marine Pollution Bulletin*, 60(11), p.p. 1969-1977.
- How Climate Change Impacts Our Water. (2019).** [En ligne]. [Page consultée le 10 septembre 2022]. *State of the Planet*. Disponible sur le web : <https://news.climate.columbia.edu/2019/09/23/climate-change-impacts-water/>
- Kumar, A., Fernández, M., Vergés, J., Torne, M., & Jiménez-Munt, I. (2021).** Opposite Symmetry in the Lithospheric Structure of the Alboran and Algerian Basins and Their Margins (Western Mediterranean): Geodynamic Implications. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126(7), p.p. 1-33.
- La télédétection / Résilience des récifs. (2020).** [En ligne]. [Consulté le 18 septembre 2022], disponible sur le web : <https://reefresilience.org/fr/management-strategies/remote->

sensing-and-mapping/introduction-to-remote-sensing/what-is-remote-sensing/

Le Cozannet, G. (2016). *Les conséquences de l'élévation du niveau marin pour le recul du trait de côte.* p.242.

Melet, A., Buontempo, C et al (2021). European Copernicus Services to Inform on Sea-Level Rise Adaptation: Current Status and Perspectives. *Frontiers in Marine Science*, p.8.

Mellah, A., Abdelhafid, Y., Benmalek, A. (2019). *Energy Consumption Policy, GHG Emissions and Climate Change Impact in Algeria.* December.

Mélia, D. S. (2022). Les principaux enseignements du 6e rapport du groupe I du GIEC. *Annales des Mines-Responsabilité et environnement*, 106(2), p.p. 11-16.

Mohamed, B., Abdallah, A. M., Alam El-Din, K., Nagy, H., Shaltout, M. (2019). Inter-Annual Variability and Trends of Sea Level and Sea Surface Temperature in the Mediterranean Sea over the Last 25 Years. *Pure and Applied Geophysics*, 176(8), p.p. 3787-3810.

Moullec, F. (2019). *Impacts du changement global sur la biodiversité en mer Méditerranée Une approche par modélisation End-to-End.* Science de vivant. Thèse de doctorat. France : Université de Montpellier unité de recherche marbec (marine biodiversity, exploitation and conservation), p. 346

Mukherjee, D. (2016). Global Warming and Its Impact on Water Resources. *International Journal of Engineering Sciences and Research Technology*.
https://www.academia.edu/25192734/global_warming_and_its_impact_on_water_resources

Nunez, C. (2022, février 16). Élévation du niveau de la mer : Les chiffres clefs. National Geographic. [En ligne]. [Consulté le 04 novembre 2022], disponible sur le web : <https://www.nationalgeographic.fr/environnement/elevation-du-niveau-de-la-mer-les-chiffres-clefs>

Nykjaer, L. (2009). Mediterranean Sea surface warming 1985–2006. *Climate Research*, 39(1), p.p. 11-17.

Otmani, H. (2020). *Etude et évaluation de la vulnérabilité des systèmes côtiers dans la*

région algéroise. Thèse de Doctorat. Environnement marin. Alger : Ecole nationale supérieure des sciences de la mer et de l'aménagement du littoral. p. 27.

Parker, L., & Craig, C. (2017, juin 26). Les récifs coralliens pourraient disparaître avant 2050. [En ligne]. [Consulté le 10 novembre 2022], disponible sur le web : <https://www.nationalgeographic.fr/environnement/les-recifs-coralliens-pourraient-disparaitre-avant-2050>

Pastor, F., Valiente, J. A., & Khodayar, S. (2020). A Warming Mediterranean: 38 Years of Increasing Sea Surface Temperature. *Remote Sensing*, 12(17), p. 2687.

Pastor, F., Valiente, J. A., & Palau, J. L. (2018). Sea Surface Temperature in the Mediterranean: Trends and Spatial Patterns (1982–2016). *Pure and Applied Geophysics*, 175(11), p.p. 4017-4029.

Piero. (2018, septembre 23). Comprendre la télédétection passive et la télédétection active | Groupe Etudes et Travaux Géographiques. [En ligne]. [Consulté le 10 novembre 2022], disponible sur le web : <https://etggroupe.wordpress.com/2018/09/23/comprendre-la-teledetection-passive-et-la-teledetection-active/>

Pisano, A., Marullo, S., Artale, V., Falcini, F., Yang, C., Leonelli, F. E., Santoleri, R., & Buongiorno Nardelli, B. (2020). New Evidence of Mediterranean Climate Change and Variability from Sea Surface Temperature Observations. *Remote Sensing*, 12(1), p. 132.

Shaltout, M., & Omstedt, A. (2014). Recent sea surface temperature trends and future scenarios for the Mediterranean Sea. *Oceanologia*, 56(3), p.p. 411-443.

Skiris, N., Sofianos, S., Gkanasos, A., Mantziafou, A., Vervatis, V., Axaopoulos, P., & Lascaratos, A. (2012). Decadal scale variability of sea surface temperature in the Mediterranean Sea in relation to atmospheric variability. *Ocean Dynamics*, 62(1), p.p. 13-30.

Sui, X., Zhang, R., Wu, F., Li, Y., & Wan, X. (2017). Sea surface height measuring using InSAR altimeter. *Geodesy and Geodynamics*, 8(4), p.p. 278-284.

Swapna, P., et al. (2020). Sea-Level Rise. In R. Krishnan, J. Sanjay, C. Gnanaseelan, M. Mujumdar, A. Kulkarni, & S. Chakraborty, Assessment of Climate Change over the Indian

Region: A Report of the Ministry of Earth Sciences (MoES), Government of India, p.p. 175-189.

Trifide, G. (2016, avril 26). *La télédétection par laser ou LiDAR « light detection and ranging »*. Groupe Trifide. <https://www.groupetrifide.com/teledetection-laser-lidar-light-detection-and-ranging/>

Tuel, A., & Eltahir, E. A. B. (2020). Why Is the Mediterranean a Climate Change Hot Spot? *Journal of Climate*, 33(14), p.p. 5829-5843.

Von Schuckmann, K et al. (2019). Copernicus Marine Service Ocean State Report, Issue 3. *Journal of Operational Oceanography*, 12(sup1), S1-S123.